

减震缓冲器的设计构想

范雷彪 丛陪历

(包头市地震局, 包头 014010)

摘要 应用隔震原理可以起到减轻地震作用力的效果。在实际应用中将隔震原理转化为隔震技术, 需要解决好相应的技术问题。为此, 本文在这方面做了一些探索, 设计了一种专用装置——减震缓冲器。该装置是通过设置核心部件——弹力钢球, 使其与隔震支座配合作用, 既较好地起到了化解、缓冲部分地震波的作用, 同时也解决了在单独使用隔震支座时可能遇到的问题。

关键词: 减震缓冲器 隔震支座 弹力钢球 地震波

引言

笔者从相关资料介绍中了解到关于隔震支座的应用情况, 并结合自己多年来从事地震研究工作的经验积累, 认为单独使用隔震支座, 存在有不完善之处, 从而产生了设计减震缓冲器的构想, 经过多年的反复钻研, 最终完成了减震缓冲器的结构设计。

而设计应用各种隔震技术是当今工程抗震防灾的前沿领域, 当前世界各国都竞相展开对这方面的研究, 并致力于该技术的推广与应用。笔者希望所设计的减震缓冲器能够为专业人士的研究提供一些有用的借鉴和参考。

1 减震缓冲器的设计构想及布设

1.1 减震缓冲器的构想原理

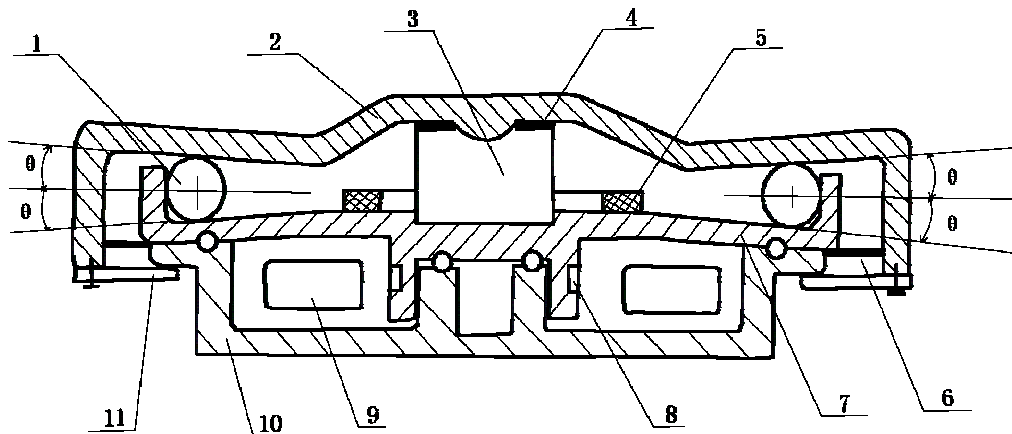
减震缓冲器的构想是通过下面一个小实验得到启发的: 用两个瓷盘, 其中一个瓷盘周圈布设有 20 粒滚珠, 并滴入少许食用油 (称为甲盘), 再在其上叠放几层小木板; 而另一个瓷盘中什么也不加 (称为乙盘), 直接叠放几层木板。分别用手以最快的频率往复抽动两个瓷盘, 结果会发现没有滚珠的瓷盘上的木板很快就出现错动、散落; 而有滚珠的瓷盘, 其木板虽也出现摆动、错位现象, 但木板没有散落。从这个实验中可得出两点结论: ①乙盘的木板掉落是因为结构体全部吸收了波动能量, 而且结构体的自身固有摆动周期与波动周期相差较大, 在结构体内产生有作用力。②甲盘的木板没有掉落是因为通过滚珠的滚动作用, 消减了部分作用力, 同时也改变了作用在结构体上的波动频率。

[收稿日期] 2009-01-16

[作者简介] 范雷彪, 男, 生于 1962 年。副研究员。主要从事地震形变观测。E-mail: fanleibiao.1962@163.com

1.2 减震缓冲器的结构形状和主要构件

根据上述构想,图 1 给出了减震缓冲器的结构示意图。减震缓冲器的外观大体同实验室的蒸发器皿相似,由上扣盖、活动底盘和固定底座组成。其中,上扣盖的直径约为 60cm,而活动底盘的直径则略小之。在活动底盘内安装有 3 个主要构件:①PΦX320-I 型隔震支座,配置在活动底盘的中央;②弹力钢球,沿圆周内圈布设在活动底盘内,材质为不锈钢,其数量由具体的承重要求计算确定;③磁性材料圈,套在隔震支座的外部。组装时,首先在活动底盘上安装上述 3 个构件,然后将上扣盖和活动底盘上、下对合后,再嵌入固定的底座中,这样就形成了一个完整的减震缓冲器。



1. 弹力钢球; 2. 上扣盖; 3. PΦX320-I 型隔震支座; 4. 石墨层; 5. 磁性材料圈;
6. 密封石棉板; 7. 活动底盘; 8. 螺旋接口; 9. 检测窗口; 10. 固定底座; 11. 单指抓钩

图 1 减震缓冲器结构示意图

Fig.1 Configuration sketch map of shock absorption buffer

PΦX320-I 型隔震支座是《建筑抗震设计规范 (GB 50011-2001)》(中华人民共和国国家标准, 2001)中给出的标准件,直径 $D=300\text{mm}$,高 $H=112\text{mm}$ 。它的基本力学性能是:在没有水平作用力的情况下,竖向极限承载力为 63.6MPa;在没有竖向作用力的情况下,最大水平位移量为 179.8mm;支座在承受 12MPa 的载荷时,其水平位移量几乎丧失,此时不能承受水平作用力。由支座的力学性能可知,支座的水平位移量与它的承载量有关,载荷越大水平偏移量越小。同时,支座的水平偏移会产生阻尼力 R , R 的大小与支座的承载力、水平倾斜量以及对它作用力的频率相关。

弹力钢球是减震缓冲器中的核心元件,它需要具有一种特殊的性能,即在承受一定的压力之后,开始出现弹性形变,其抗压和弹性形变能力都较高(相当于一种刚性皮球的作用)。弹力钢球由一个具有一定壁厚的外壳钢球和一个实心橡胶球组成,外壳钢球将实心橡胶球包裹在其核心中。弹力钢球的直径为 14cm,其外壳的壁厚和材质是决定其承压能力和弹性能力的前提。这种弹力钢球需要经过特殊的工艺加工,同时对生产出的弹力钢球还要进行专门的技术检测,以得到一组测定值(包括最大承压力、起始形变值、塑性反弹力等)。根据测定值的大小,并结合减震缓冲器的配置可确定每个减震缓冲器内弹力钢球的个数,通常根据减震缓冲器的结构尺寸和钢球的直径,每个减震缓冲器中配置的钢球在 10—12 个。

1.3 减震缓冲器的设置方式及布设数量

应用减震缓冲器的前提条件,是在设计上需将建筑物主体与地基部分设计成相对分离的

主体。地基可以是桩基结构或其它形式结构，只要符合前提条件即可。具体的做法是：将减震缓冲器置于基础与建筑物底圈梁之间，先将每个减震缓冲器的固定底盘打入到基础墩的混凝土中，然后扣上活动底盘，但活动底盘不能打入基础墩的混凝土内，需暴露在混凝土外，以便以后进行检修和维护。然后在活动底盘内装配好各种构件，盖好上扣盖，同时在上扣盖与固定底座间安装若干个单指抓钩（其作用在后面介绍），之后将上扣盖打入建筑物底圈梁的混凝土中，完成减震缓冲器的安装。

基础的牢固可靠是应用减震缓冲器的先决条件，基础的设计除符合《建筑抗震设计规范（GB 50011-2001）》要求外，对强度、深度、布设根数等会有特别要求。首先要考虑好基础的布设点，需根据建筑物的拐点位置及位置间距尺寸的具体承载情况来计算确定桩基的参数。

减震缓冲器个数的选定，是依据弹力钢球的性能参数并结合建筑物的重量和结构特征，以及该地区未来若干年内可能面临的强地震等因素综合考虑的。具体确定方法如下：首先需要列出一个在不同烈度区内的纵向作用力的参数表（以纵向作用力数据为依据，因为弹力钢球只要能够满足纵向压力作用要求，即能满足横向地震力对其产生的挤压作用）。建筑物受到的纵向作用力通常为：

$$F=KW$$

式中， K 为纵向地震力作用系数； W 为建筑物的重量。

以一个平面形状呈“L”形、总重量 200t 的建筑物为例，对于地震烈度区分别为Ⅵ度、Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度，其 K 值分别取 0.2g、0.25g、0.3g 和 0.4g。如果布设 12—16 个减震缓冲器，则每个减震缓冲器在不同的震级情况下所承担的纵向作用力分别如表 1 所示。

表 1 减震缓冲器的配置数目选用参考表

Table 1 Recommended number of elastic steel balls in the shock absorption buffer

烈 度 个 数	Ⅵ度 (392t)	Ⅶ度 (490t)	Ⅷ度 (588t)	Ⅸ度 (784t)
12 个	32.67	40.83	49.00	65.33
14 个	28.00	35.00	42.00	56.00
16 个	24.50	30.63	36.75	49.00

然后再做选定计算，假设该地区在未来若干年内可能遭遇的地震破坏烈度为Ⅷ度，而某项工艺完成的弹力钢球的最大承压力为 3t，则先用 12 个减震缓冲器进行计算，由表 1 可查得其受到的纵向作用力为 49t，钢球的总承压力为 $12 \times 3 = 36t$ ，显然 12 个减震缓冲器还不能满足需求，应继续选择减震缓冲器的个数，可改用 16 个减震缓冲器进行计算，得到的结果为 $16 \times 3 = 48t$ ，虽然这个数目已经基本符合需求，但考虑到建筑物的平面形状，仍需再增设 2 个减震缓冲器，最终以选用 18 个减震缓冲器为宜。

对 K 值的取值说明：参考《房屋建筑抗震设计手册》（中华人民共和国建设部，2000）和《地震安全性技术评价教程》（胡聿贤，2003）中对横向加速度与烈度的关系，将烈度区Ⅶ度和Ⅸ度的取值定为 0.2g 和 0.4g。本文表 1 中所列数据只是示范性的，并非为专业计算而用，因此没有按“建筑抗震设计规范”要求那样，具体地考虑场地情况、结构特征对不同烈度等级逐一进行计算。

2 减震缓冲器对地震作用力的化解过程

在遇有地震时,减震缓冲器与建筑物的平衡状态会发生改变,具体的变化情况是根据地震的表现类型(近震、远震、强震、弱震)而不同。本文在此提到的近震、远震,不是测震学中所指的近震、远震概念(1000km以内为近震),而是以GBJ11-89“建筑抗震设计规范”中提到的设计近震和设计远震为概念。在“建筑抗震设计规范”中给出的定义是:在烈度区划图中,比等震线中心最高烈度低1度或相等的地区,接近震考虑;比等震线中心最高烈度低2度和2度以上地区,按远震考虑(郭继武,1998)。

2.1 减震缓冲器对纵向地震力的作用情况

当中、强地震发生时,如建筑物的位置处在“建筑抗震设计规范”中的近震范围,则此时的地震作用力以纵向为主,当地震波传递给建筑物后建筑物会随着波动呈起伏状态,被向上抬升、下落。在这一过程中,建筑物受到纵向地震力作用的破坏体现在两个方面:一是建筑物被抬升的量越大,在其结构内部产生间隙的可能性就大,特别是多层砌块结构建筑物越容易出现间隙,间隙量的大小是决定建筑物受到破坏程度大小的主要因素;二是建筑物被抬升时,如果建筑物主体部分与地基基础间是处于非整体性联接,那么建筑物将出现被弹升现象,此刻其与地基的稳定性就差,出现的摆动量就大,建筑物的倾斜、偏移加重了其结构的承载力,同时建筑物在下落时产生的惯性冲击力远远大于建筑物自身的重力,该力在地基上产生的反作用力必然会对建筑物的结构造成相当程度的破坏。

基于上述分析,要想避免这些破坏现象的发生以及减轻灾害的破坏程度,一是设法阻止在建筑物与地基间出现间隙量的可能性或者将间隙量减小到最小,设法保持建筑物与地基间的稳定性(最大限度的避免弹升现象发生);二是设法在建筑物下落时能给它有一定的缓冲作用,尽量避免出现直接冲击现象的发生。

要彻底避免建筑物被抬升时不与地基部分产生间隙量,就必须在设计上将其主体与地基部分构成一个整体,这样做又与减震缓冲器的应用前提条件相矛盾,怎样才能做到既让地基部分与建筑物有相对水平运动,又能保证建筑物不被弹升(不与地基产生出间隙量)。本文在减震缓冲器的设计上,采取了以下两种应对措施可较好地解决上述问题:①在上扣盖的外沿处设计有若干个单指抓钩,虽然在整体上建筑物与地基呈分离状态,但通过单指抓钩作用(连接上扣盖和固定底座),让建筑物与地基形成了一体连接,保持了建筑物与地基的稳定性,不会出现被弹升现象,同时还不影响上扣盖的旋转、平移运动。②在减震缓冲器中设计有弹力钢球、磁性材料圈和隔震支座。当建筑物被抬升时,使上扣盖与活动底盘间的间隙会有一定的增大量,这个间隙量是在单指抓钩与固定底座间预留的,间隙量是由隔震支座的压缩量决定的,其量级很小只有几毫米的变化,此时,隔震支座恢复反弹,同时弹力钢球在磁力吸引下会向中心靠拢,填充间隙量的变化;当建筑物下落时,弹力钢球被挤压又向外扩散滚动,在滚动过程中形成了一种缓冲作用效果,再加上隔震支座的压缩作用,保证了建筑物会平稳地与减震缓冲器接触,从而最大限度地避免了建筑物与其发生冲击,有效地起到对建筑物保护的目。

2.2 减震缓冲器对横向地震力的作用情况

当中强地震发生时,如果建筑物的位置处在“建筑抗震设计规范”中的设计远震,此时的地震力以横向作用为主。

假设有一个向左的地震力，当这个地震力作用到地基时，其最大初始值为：

$$V=CkW$$

式中， C 为建筑物结构系数； k 为地震系数； W 为建筑物重量。

如果没有减震缓冲器，这个地震力就是对建筑物的作用力，而布设了减震缓冲器后，这个地震力首先被减震缓冲器吸收，然后才作用到建筑物上。在这一过程中，建筑物与地基（上扣盖与活动底盘）会发生位移错动，错动的延时效果就是减震缓冲器对这个地震力的缓冲时间，也是这个地震力被化解的过程。

活动底盘受到地震力的作用向左错动时，在减震缓冲器中伴随有三种变化（图 2）：一是右边的 B 球和它两侧钢球，随着活动底盘向前强行滑动，滑动中产生一个向右的摩擦力（其值大小 $f=\mu W$ ， μ 为摩擦系数； W 为建筑物重量）；二是左边的 A 球及它两侧的钢球，虽然只做原地滚动，但活动底盘的错动也相当于它们向中心位滚动，由于两边的钢球同时向中心位逼近，会通过上扣盖对建筑物产生一个向上的推举力 T ，其值为： $T=\cos\theta\cdot\sin\theta\cdot V$ ；三是隔震支座呈现向右的倾斜状态，与此同时，隔震支座的倾斜还产生一个阻尼力 R （其值大小由支座特性决定）。

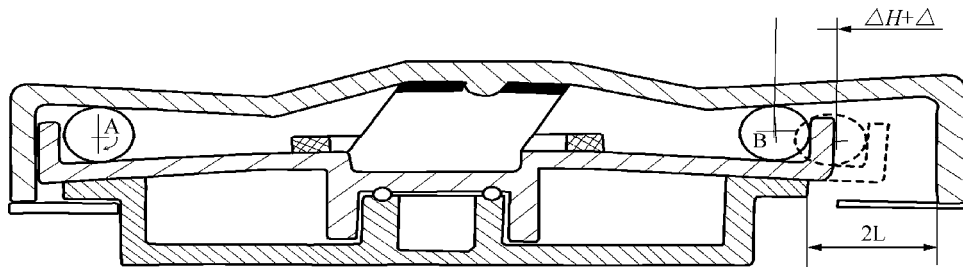


图 2 减震缓冲器的受力变化状态

Fig.2 Stress and strain condition of shock absorption buffer

这时，减震缓冲器发挥出两方面的作用：一是有了延时、缓冲作用时间 Δt （ Δt 的大小由 ΔH 的量程和角度 θ 的大小决定），根据减震缓冲器结构尺寸和将要面临的地震类型，可以设定出该值的大小，比如取 $(0.3-0.5)s$ ；二是对初始的地震力进行了分解，并伴生出两个分力，使其最终作用到建筑物上的力为 F' ，该值的大小为初始作用力 V 的分力 F 减去阻尼力 R 再减去摩擦力 f ，即 $F'=F-R-f$ 。由此可见， F' 与 V 相比是少了许多，因此它对建筑物的保护作用效果是明显的。

关于 $F=V\cdot\text{tg}\theta\cdot\sin\theta$ ； $T=\cos\theta\cdot\sin\theta\cdot V$ 的数据结论，对减震缓冲器的结构作静力分析可以得出此数据（图 3）。

另外，地震波中 S 波的周期在 $0.05-0.5s$ 之间变化（国家地震局，1996）。地震波中越是高峰值的波，其频率也高，地震力的最大值是随着最大峰值产生的。如果在减震缓冲器的作用时间内，有一地

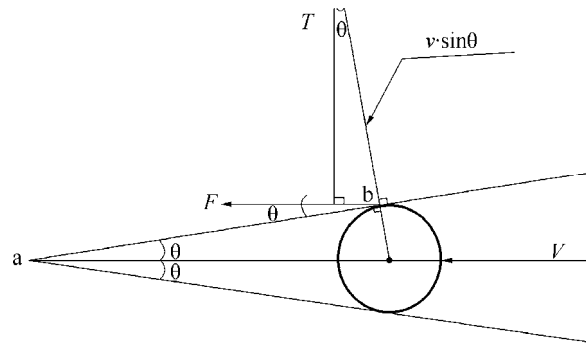


图 3 弹力钢球受力分析

Fig.3 Force analysis of the elastic steel ball

震峰值出现,那么此时减震缓冲器正好可以将此峰值过滤转化掉,因为延时,缓冲作用时间可设定到(0.3—0.5)s,此时间恰好是地震波的作用时,从而使建筑物避开了一次地震力的高峰值作用。

通过对上述过程的分析可以看出,减震缓冲器以四种方式改变并缓解了地震力的作用,起到了保护建筑物的目的。一是对初始的作用力进行了分解,使其成为 $F(F=V \cdot \text{tg}\theta \cdot \sin\theta)$;二是由隔震支座产生的阻尼力 R 抵消了部分地震力;三是产生出摩擦阻力 f 消耗地震力;四是减震缓冲器有频率转化的功效,通过它的低频错动可对高频的地震波进行转化、吸收,从而化解掉地震波的峰值作用力。

同时,从力的分析上也可以看出,通过减震缓冲器最终作用到建筑物上的地震力是 F' ,该力远远小于初始作用力 V 。根据《房屋建筑抗震设计手册》(中华人民共和国建设部,2000)介绍,隔震技术一般可以缓解掉60%左右的水平向地震作用力,本文介绍的减震方法,其对水平向地震力的作用,是对典型的滚珠隔震技术的应用,因此它也会起到同样的效果。

2.3 对减震缓冲器的作用情况说明

在本设计方案中,使上扣盖和活动底盘两者的位置关系处于一种既独立,又有相互联系的状态,目的是使它们之间具有一定的相对旋转运动、相对的平移错动、限制出现上下位移活动。各运动方式是针对不同的地震力作用情况,使其发挥出相应的作用。减震缓冲器的旋转运动可以有效地防止建筑物在地基出现扭曲错动时对其产生的破坏;减震缓冲器的平移错动是专门为了应对横向地震力的作用;而限制减震缓冲器出现较大上下位移是为应对纵向地震力的破坏,但是具有的小间隙量又可起到较好的缓冲作用效果。

在隔震缓冲器中同时布设弹力钢球和隔震支座为的是发挥出两方面的作用:

一是协调配合共同应对地震作用力。在正常情况下(建筑物的总重量加载荷量不超过限定值),建筑物的重量主要是由隔震支座来支承,因为隔震支座是经过检测的标准件产品,其性能是可以经受住长期的重压,而且其最大承重为12MPa约折合43t,按前面列举的200t建筑物计算,如配置12个减震缓冲器,则每个减震缓冲器平均分担18t的重量,是完全符合使用条件的。在遇有横向地震作用力时,因为此时弹力钢球会向里运动并顶起上扣盖和建筑物,开始分担隔震支座的压力。弹力钢球负担压力后,减轻了隔震支座的压力,保证隔震支座能有较好的水平位移性能,使其可发挥出更好的阻尼作用效果。地震力越大,弹力钢球向里滑动的越深,隔震支座承受的压力减轻量越大,阻尼作用效果越强。当遇有纵向地震作用力,此时是由隔震支座先接受作用力,紧接着弹力钢球也开始承担纵向地震作用力。从前面的介绍中可知,虽然在弹力钢球的数量达到一定个数时,隔震支座本身就可以承担全部地震力的作用,但是压力过大会碍于其性能的发挥,而共同作用的效果则有助于其性能得到最大限度的发挥。

二是有相互保护作用。在没有地震作用,当建筑物的总重量加载荷量超过限定值(隔震支座的弹性形变达到一定值)时,弹力钢球会自动分担压力;当有纵向地震力作用时,因为在建筑物下落时惯性冲击力很大,如果只有弹力钢球支撑,或只有隔震支座,很容易导致弹力钢球在超出弹性极限后,出现塑性变形,或使隔震支座性能丧失。而现在我们采用双重作用,可极大地降低破坏的危害性,保证弹力钢球或隔震支座都能经受的起纵向地震力的作用而不受破坏。这样既保证了钢球不被破坏,又能使它尽快反弹恢复原状,保证其能重复多次地使用。

3 减震缓冲器应具有的性能及维护措施

3.1 减震缓冲器在设计上应具有的一些基本性能

根据地震作用力对建筑物的破坏过程，一个有效的减震缓冲器必须具有以下几项基本性能：一是它通过一定的方式对横向和纵向的地震力都具有一定的缓冲、减震作用，能够对建筑物起到良好的保护效果；二是要求地震后减震缓冲器能够保证建筑物不与地基出现较大的位置偏移，它应具有一定的自行复位功能，使之始终处于工作状态区内，并保证其对建筑物的保护作用能重复使用；三是鉴于减震缓冲器的特殊用途要求，应保证其性能优良并经久耐用，有较强的抗腐蚀、抗老化性能。

3.2 减震缓冲器的位移复位性能

减震缓冲器的位移复位性能好坏，是关系到该技术对横向地震作用力效果优越的重要标志。在本文的设计中，减震缓冲器的复位主要靠减震缓冲器的自身运动来实现。活动底盘的设计最大位移为 L ，在活动底盘先错动 ΔH (ΔH 值是由地震情况确定的) 位移量后，活动底盘才对建筑物起作用，此时两者的速度不同，以至它们移动达到预定值 L 后，两者才会同步 (此时的总位移量为 $\Delta H + \Delta = L$)。在建筑物随活动底盘一起运动时，活动底盘与上扣盖之间的位置是错开的 (见图 2)。当地震作用力出现间歇状态或趋于最小时，此时地基的运动趋于停缓，而建筑物受惯性作用会继续产生前移的量，同时再加上隔震支座的反弹力作用，这样它们会使上扣盖与活动底盘的位置基本上恢复到初始状态，形成一个作用周期。

3.3 减震缓冲器的维护及防腐抗老化措施

在本文的设计中，上扣盘、活动底盘、底座都是铸铁件，选用铸铁件的原因是铸铁件的抗腐蚀性能较强，其次，它还有较强的吸振性能，可以吸收地表的振动。同时，在活动底盘的下端留有注油孔，打开螺栓可以定期注入润滑油。在地震后，打开固定底座的检测窗口 (窗口平时封闭)，用杠杆与活动底盘的螺旋接口连接，转动活动底盘。通过转动，一来可以调整隔震支座，使其恢复到垂直状态 (因为此时支座可能是呈倾斜状的)；二来可以使钢球改变接触点充分接触润滑油，防止其生锈，调整钢球的位置，也保证了减震缓冲器的灵敏性。在隔震支座与上扣盖间添加石墨层是为了保证其转动的灵活性，在完成活动底盘调整后，再为其更换石棉板密封垫，防止沙土的进入。

4 结束语

本文提出的减震缓冲器设计方案是在吸收、借鉴隔震支座的基础上，形成的一种新装置。它与现行的各种隔震、消能器件相比具有以下 3 点优势：

(1) 该装置对横向地震作用力有一定的化解作用效果；同时对纵向地震作用力也具有较理想的缓冲功能。

(2) 该装置可进行人工检修、复位调整，可实现多次利用。

(3) 该装置具有滤波功效，它通过滚珠的滚动作用，可以在一定间隔时间段内，对将要传递到建筑物的地震波频率进行改变，起到过滤掉地震波中最大峰值的效果。

该装置目前只是设计构想阶段，其可适用于何种建筑、存在的问题，还有待做进一步的理论、实践探讨。

参考文献

- 国家地震局, 1996. 地震观测技术. 北京: 国家地震局.
- 郭继武, 1998. 建筑抗震设计基础. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 胡聿贤, 2003. 地震安全性评价技术教程. 北京: 地震出版社.
- 中华人民共和国建设部, 2000. 房屋建筑抗震设计手册. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 2001. 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2001). 中国建筑工业出版社.

A Design of Shock Absorption Buffer

Fan Leibiao and Cong Peili

(Seismology Bureau of Baotou City, Inner Mongolia Municipality, Baotou 014010, China)

Abstract The earthquake damage can be reduced by using shock-insulation and energy-dissipation technique. Base on the shock-insulation technique a special shock absorption buffer device is designed. By jointing shock-insulation pedestal and elastic steel ball together the effect of shock-insulation is greatly improved.

Key words: Shock absorption buffer; Shock-insulation pedestal; Elastic steel ball; Earthquake wave