第31卷 第4期
2009年12月

西 北 地 震 学 报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL

Vol. 31 No. 4
Dec., 2009

# 网架减震球型钢支座减震性能振动台试验研究

施卫星[1]，刘凯雁[1]，王立志[2]

（1. 同济大学结构工程与防灾研究所，上海 200092；
2. 衡水丰泽工程橡胶科技开发有限公司，河北 衡水 053000）

**摘 要**：针对网架结构的受力特点，提出了一种新型网架减震球型钢支座。按照相似原理制作了网架减震球型钢支座的缩尺模型，并通过模拟地震振动台试验系统地研究了这种支座在地震作用下的减隔震性能。试验结果表明，网架减震球型钢支座能够有效阻隔地震动向上部结构的传递，滞回环饱满、等效阻尼比大，具有良好的隔震及减震耗能能力。

**关键词**：网架减震球型钢支座；减震性能；振动台试验；缩尺模型

**中图分类号**：TU317 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－0844(2009)04－0344－05

# Shaking Table Test Study on Damping Performance of Steel Ball-bearing for Grid Structure

SHI Wei-xing[1], LIU Kai-yan[1], WANG Li-zhi[2]

(1. *Research Institute of Structural Eng. And Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai* 200092, *China*;
2. *Hengshui Fengze Engineering Rubber S&T Development CO., LTD., Hebei Hengshui* 053000, *China*)

**Abstract**: A new type of steel ball－bearing is presented to match the stress features and requirements of grid structures. According to the similarity principle, four scale models of grid steel ball-bearing were made and shaking table test was carried out to systematically study the isolation and damping performance of them under different seismic inputs. The results show that the bearings can effectively isolate the input of seismic vibration into upper structure and have better damping and energy dissipation ability.

**Key words**: **Steel ball-bearing for grid structure; Damping performance; Shaking table test; Scale model**

## 0 引言

结构减隔震技术是近些年来结构抗震研究领域内的一个热点。在结构的适当位置安装减隔震支座是一种十分有效的减震隔震方式[1-2]，目前在桥梁结构中有着较多研究和应用。随着社会、经济的发展以及人们抗震意识的提高，在民用建筑中通过采用这一技术手段来提高结构的抗震性能具有广阔的发展前景。

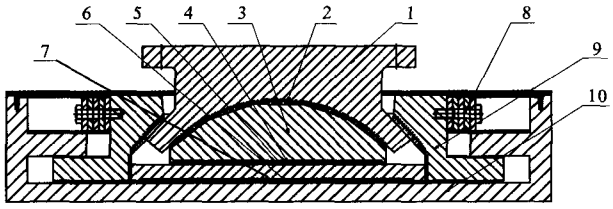
网架结构因其经济美观、节点形式灵活等优点成为空间结构中应用最为广泛的一种类型[3]。网架结构中只考虑杆件承受拉压作用，通常按节点铰接、支座简支来进行设计。为了使结构实际受力与计算假定相符以保证计算结果的准确可靠，同时提高结构的减隔震性能，网架支座的合理形式应该具有万向转动、双向活动以及良好的耗能能力。针对以上要求，本文依据我国现行行业标准[4]提出了一种新型网架减震球型钢支座，并通过模拟地震振动台试验系统地研究了这种支座的减隔震性能。

## 1 网架减震球型钢支座

网架减震球型钢支座主要由上支座板、球面四氟板、中间球面板、平面四氟板、不锈钢板、弹性元件（板弹簧）、底座和下支座板等部件组成，如图1所

收稿日期：2008-11-03
作者简介：施卫星（1962－），男（汉族），上海人，教授，博士，博导，主要从事工程抗震方面的研究.

示。




1. 上支座板；2. 球面四氟板；3. 中间球面板；4. 平面四氟板a；5. 不锈钢板a；6. 平面四氟板b；7. 不锈钢板b；8. 弹性元件；9. 底座；10. 下支座板

图 1　网架减震球型钢支座构造

Fig. 1　Steel ball-bearing for grid structure.

支座中，转角通过上支座板与中间球面板、底座的相对转动来实现；由底座在下支座板中的滑移提供径向和环向位移；抗拔力和水平力由上支座板、底座和下支座板共同提供。网架减震球型钢支座的特点在于：(1)能够承受较大的竖向荷载且传力可靠；(2)具有良好的抗水平力和抗拔能力，确保了支座在地震作用下的有效工作；(3)通过弹性元件(板弹簧)的变形实现支座在径向和环向的双向活动，并可在较大范围内调整弹性元件的刚度以控制支座的位移量；当采用多片弹性元件层叠设置时，层与层之间在工作过程中将产生相对挤压和摩擦，增大了支座耗能，使支座具备良好的减震性能；(4)利用平面四氟板和不锈钢板之间摩擦系数小的特点确保支座滑移顺畅，但未在二者接触面上涂抹硅脂润滑剂，以保留一定的摩擦耗能能力；(5)上支座板和底座之间的曲面接触解决了大多数支座不能在转动时同时抗拔的缺陷，真正实现了万向转动和万向受力，而且转动角度远远大于普通支座(0.02 rad)。

## 2　网架减震球型钢支座模型振动台试验

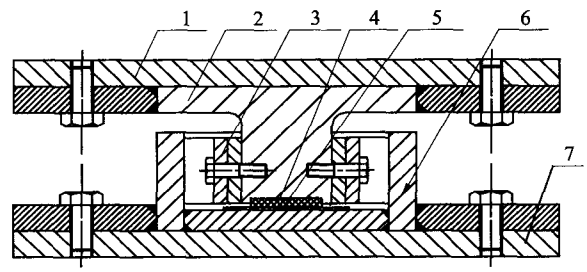
### 2.1　支座模型及试验内容

为了系统地评价网架减震球型钢支座的减隔震性能，在同济大学土木工程防灾国家重点实验室对其进行了模拟地震振动台试验。由于试验的目的在于测试支座的减隔震性能，所以试验中对支座的转动性能不作考虑，并将上支座板、中间球面板以及底座简化为一体。试验支座的构造如图 2 所示。

按照相似原理[5]制作了四个该支座的试验模型，主要相似系数见表 1。模型径、环向位移量为 15 mm。

表 1　支座模型主要相似系数

| 长度 | 时间 | 加速度 | 应力 | 力 |
|---|---|---|---|---|
| 1:7.745 | 1:2.783 | 1:1 | 1:1 | 1:60 |




1. 上支座垫板；2. 上支座板；3. 板弹簧；4. 平面四氟板；5. 不锈钢板；6. 下支座板组件；7. 下支座垫板

图 2　网架减震球型钢支座模型构造

Fig. 2　Model of steel ball-bearing for grid structure.

采用同济大学 MTS 三向六自由度模拟地震振动台进行试验；由 MTS496 数据采集系统完成试验数据的采集与分析，采样频率 100 kHz。试验中，在模型支座上安装两块质量块，总重量为 9.6 吨；将 2 个压电式加速度传感器布置在质量块中部两侧，同时在支座上布设 2 个拉线式位移传感器以及 12 个电阻应变片[5]。测试的指标有：台面输入加速度、质量块的加速度反应、支座的位移及关键部位的应变反应。支座模型振动台试验系统如图 3 所示。

### 2.2　试验波形

采用 3 种台面输入波形：

(1)白噪声：整个频域范围内功率谱密度均匀分布的随机波，用于测试试验体的动力特性和支座的减隔震性能，频率 0.1～50 Hz；(2)正弦波：具有周期性，用于研究支座的滞回特性、减震耗能能力，正弦波扫频频率为 0.1～50 Hz，扫频速率 2 倍频程/分钟；(3)天然地震记录：本试验选用 El－Centro 波 NS 方向并进行调幅，用以研究模型支座在天然地震动下的滞回性能、耗能能力及减震性能。整个试验共包括 12 个工况，如表 2 所示。

图 3　支座模型振动台试验系统

Fig. 3　Shaking table test of the bearing model.

## 3　试验数据处理及分析

### 3.1　加速度反应及动力放大系数

按照上述工况依次加载，将实际台面输入加速度峰值、质量块最大加速度反应以及二者的比值——动力放大系数列于表 3。

**表 2 振动台试验步骤**

| 工况 | 试验内容 | $\alpha_{max}$/g | 工况 | 试验内容 | $\alpha_{max}$/g | 工况 | 试验内容 | $\alpha_{max}$/g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 白噪声 | 0.1 | 5 | 正弦波 | 0.2 | 9 | El Centro 波 | 0.4 |
| 2 | 正弦波 | 0.1 | 6 | El Centro 波 | 0.2 | 10 | 白噪声 | 0.8 |
| 3 | El Centro 波 | 0.1 | 7 | 白噪声 | 0.4 | 11 | 正弦波 | 0.8 |
| 4 | 白噪声 | 0.2 | 8 | 正弦波 | 0.4 | 12 | El Centro 波 | 0.8 |

注：$\alpha_{max}$设计台面输入加速度最大值/g

**表 3 加速度反应及动力放大系数**

| 工况 | 试验内容 | $\alpha_{gmax}$/g | $\alpha_{mmax}$/g | $d=\frac{\alpha_{mmax}}{\alpha_{gmax}}$ | 工况 | 试验内容 | $\alpha_{gmax}$/g | $\alpha_{mmax}$/g | $d=\frac{\alpha_{mmax}}{\alpha_{gmax}}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 白噪声 | 0.117 0 | 0.162 8 | 1.391 4 | 7 | 白噪声 | 0.450 2 | 0.192 8 | 0.428 2 |
| 2 | 正弦波 | 0.173 7 | 0.178 4 | 1.027 1 | 8 | 正弦波 | 0.839 9 | 1.255 0 | 1.494 2 |
| 3 | El Centro 波 | 0.107 2 | 0.121 4 | 1.132 5 | 9 | El Centro 波 | 0.327 0 | 0.180 5 | 0.552 0 |
| 4 | 白噪声 | 0.217 9 | 0.143 8 | 0.659 9 | 10 | 白噪声 | 0.966 5 | 0.650 0 | 0.672 5 |
| 5 | 正弦波 | 0.347 4 | 0.248 8 | 0.716 2 | 11 | 正弦波 | 0.924 0 | 1.132 9 | 1.226 1 |
| 6 | El Centro 波 | 0.206 5 | 0.163 3 | 0.790 8 | 12 | El Centro 波 | 0.591 1 | 0.257 8 | 0.436 1 |

注：$\alpha_{gmax}$实际台面输入加速度最大值/g；$\alpha_{mmax}$质量块加速度反应最大值/g；$d$ 加速度放大系数。

分析表中数据可知：(1)每一工况实际台面输入加速度的最大值 $\alpha_{gmax}$ 与设计值 $\alpha_{max}$ 之间具有一定偏差，这是由振动台自身构造特点(如固有频率)、各输入波的波形特点以及台面加速度输入时的非线性引起的，其中以白噪声符合较好，正弦波实际输入幅值偏高，而 El Centro 波实际输入偏小。(2)输入波的频谱特性对质量块加速度反应的影响很大。虽然在试验设定的频率范围内白噪声和正弦波都可以使上部质量块出现共振，但白噪声是随机波，共振频率处的输入能较低，故而上部结构的响应较小；而当质量块在正弦波扫频过程中达到共振时，由于在共振频率下正弦波将经历若干个完整的周期，输入加速度在共振频率处可多次达到最大值，因此输入能很大，在这种较高的输入能下质量块的加速度反应也相应较大。(3)四氟板滑动面在试验开始时摩擦系数相对较高，支座滑动摩阻力大、质量块的动力放大系数偏大；随着加载持续，滑动面摩擦系数下降并趋于稳定，支座滑动顺畅，动力放大系数明显减小。

体系的动力放大系数反映了一定支撑条件下，由于动力效应上部结构加速度响应的放大倍数。对于减隔震体系而言，该指标则可以表明减隔震装置对上部结构动力响应的控制程度。在本试验的最初 3 个工况中，由于四氟板刚刚进入工作状态，摩擦系数尚未稳定，体系的动力放大系数较大；随着试验的进行，大多数工况下质量块的动力放大系数位于0.5～0.6 之间；工况 8 和 11 中由于正弦波在共振频率下的输入能较高，质量块的放大系数较其它工况偏大，但最大值为 1.494 2 仍远小于非减隔震结构在抗震规范中 2.25[6] 的取值。这说明由于支座的存在，质量块的加速度响应得到了有效的控制，体现了支座具有良好的减隔震性能。

### 3.2 支座滞回曲线及等效阻尼比

限于篇幅，这里仅给出支座在几个工况下的滞回曲线，如图 4 所示。

可以看出，当设计台面输入加速度峰值较小时，如 0.2 g(Ⅷ度烈度)正弦波作用下，支座的滞回环饱满且对称分布；当设计台面输入增加至 0.4 g(Ⅸ度烈度)时，支座的滞回曲线仍然较为丰满，由于此时正弦波的实际输入为 0.84 g，在较大外力作用下，该工况中支座内部的相对滑移已接近限值±15 mm，由于下支座板具有限位功能，支座位移不再增加；当设计台面输入达到 0.8 g 时，随着外力的不断增大并在支座损伤累积的影响下，各波形作用时支座的位移均已接近极限值，但仍可看出支座各滞回曲线所包围的面积较大，滞回环依然饱满。事实上，0.8 g 的加速度峰值已相当大，在实际中出现的机率很小，但根据试验结果可知支座在这种输入下仍然能够保持较好的耗能能力，因此直观上可以说该网架减震球型钢支座具有良好的减震消能能力，安全储备高。

根据各工况下支座的滞回曲线，可由每周能量损失法[7]求出支座的等效阻尼比，从而对支座的减震耗能能力进行定量评价：

$$\xi_{eq}=\frac{W_D}{4\pi W_S} \tag{1}$$

式中各符号含义参见文献[7]，求得的支座等效阻尼　　比列于表 4。

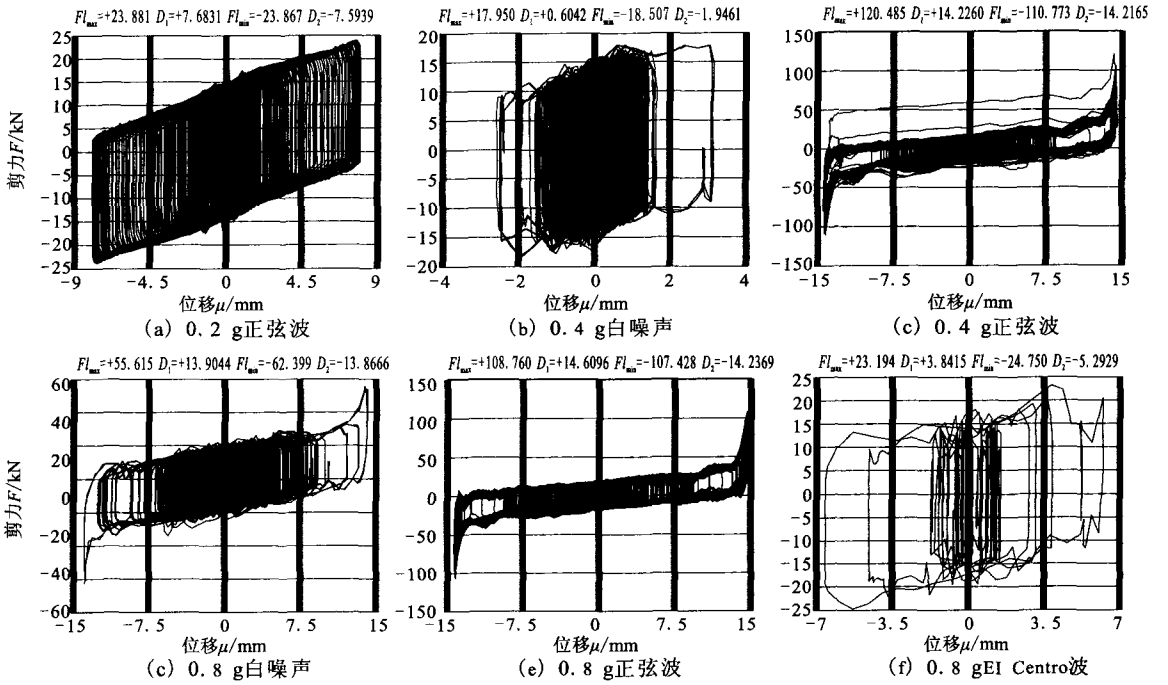



图 4　不同工况下支座的滞回曲线

Fig. 4　Hysteresis loops in different cases.

**表 4　支座等效阻尼比**

| 工况 | 试验内容 | $\xi_{eq}$/% | 工况 | 试验内容 | $\xi_{eq}$/% | 工况 | 试验内容 | $\xi_{eq}$/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 白噪声 | 23 | 5 | 正弦波 | 33 | 9 | El Centro 波 | 14 |
| 2 | 正弦波 | 29 | 6 | El Centro 波 | 18 | 10 | 白噪声 | 33 |
| 3 | El Centro 波 | 22 | 7 | 白噪声 | 31 | 11 | 正弦波 | 29 |
| 4 | 白噪声 | 28 | 8 | 正弦波 | 30 | 12 | El Centro 波 | 23 |

可见网架减震球型钢支座的等效阻尼比约为 20%～30%，与一般减震支座 15%～20%的等效阻尼比相比有所提高。阻尼比的大小反映了支座阻尼耗能能力的大小，而阻尼耗能又是结构中最为重要的耗能形式，是减震系统减震效率高低的标志。因此较大的等效阻尼比使网架减震球型钢支座具备了优良的减震性能。

### 3.3　支座应力反应

使用过程中支座的应力状态对其工作性能和使用寿命有着较大影响，为此在支座模型上粘贴四组应变花(如图 3 所示)，并从左至右由 1 到 4 进行编号。在测得每组应变花的 $\varepsilon_x$、$\varepsilon_y$ 和 $\varepsilon_u$ 后便可由公式(2)求得其主应变 $\varepsilon_1$、$\varepsilon_2$，最后利用广义胡克定律[8]由公式(3)计算得出主应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$：

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2}\left[(\varepsilon_x+\varepsilon_y)+\sqrt{2\left[(\varepsilon_x-\varepsilon_u)^2+(\varepsilon_u-\varepsilon_y)^2\right]}\right]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2}\left[(\varepsilon_x+\varepsilon_y)-\sqrt{2\left[(\varepsilon_x-\varepsilon_u)^2+(\varepsilon_u-\varepsilon_y)^2\right]}\right] \tag{2}$$

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\gamma^2}(\varepsilon_1+\gamma\varepsilon_2) \qquad \sigma_2 = \frac{E}{1-\gamma^2}(\varepsilon_2+\gamma\varepsilon_1) \tag{3}$$

式中，$E$ 为弹性模量；$\gamma$ 为泊松比。

表 5 给出了支座在天然地震波－El Centro 波

**表 5　支座应力反应(MPa)**

| 试验内容 | 测点 1 主应力峰值 | | 测点 2 主应力峰值 | | 测点 3 主应力峰值 | | 测点 4 主应力峰值 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 拉 | 压 | 拉 | 压 | 拉 | 压 | 拉 | 压 |
| El Centro 波 0.1 g | 0.630 3 | −0.877 1 | 0.263 4 | −0.408 4 | 0.550 7 | −1.466 0 | 0.671 3 | −0.895 8 |
| El Centro 波 0.2 g | 0.987 5 | −1.224 4 | 0.489 5 | −0.675 3 | 0.610 7 | −1.475 0 | 0.680 4 | −1.939 8 |
| El Centro 波 0.4 g | 1.197 3 | −1.147 8 | 1.193 5 | −1.282 2 | 1.167 4 | −1.470 1 | 1.352 1 | −3.269 7 |
| El Centro 波 0.8 g | 1.772 5 | −1.173 3 | 1.792 3 | −2.564 1 | 1.771 4 | −2.002 9 | 2.948 4 | −11.024 |

作用下各测点处主拉和主压应力的峰值。数据表明支座应力分布较为均匀，未出现局部应力过大等现象，且均远小于支座钢构件的设计许用应力。由此可说明支座安全可靠，工作性能良好。

## 4 结论

由网架减震球型钢支座模拟地震振动台试验的结果可得如下结论：该支座有效阻隔了地震动向上部结构中的传递，减小了上部结构的动力响应，隔震效果好；支座的滞回环饱满，等效阻尼比大，减震耗能能力强；试验加载过程中支座应力反应小而均匀，安全储备高；全部试验结束后，支座模型外观无异常，未见四氟乙烯滑板挤出及其它构件变形或开裂，支座的工作稳定性良好。

网架减震球型钢支座能够有效实现结构的减隔震控制，且构造简单、造价经济，因此是一种值得推广的网架结构减隔震技术装置。

## [参考文献]


[1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京：地震出版社，1997.

[2] 杜永峰，李慧，程选生，等. 隔震结构系列研究及在甘肃的工程应用[J]. 西北地震学报，2005，27(4)：312-316.

[3] 董石麟. 我国大跨度空间钢结构的发展与展望[J]. 空间结构，2000，6(2)：3-13.

[4] 球型支座技术条件(GB/T17955－2000)[S]. 北京：中国标准出版社，2000.

[5] 姚振纲，刘祖华. 建筑结构试验[M]. 上海：同济大学出版社，1996.

[6] 建筑抗震设计规范(GB50011－2001)[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2001.

[7] R 克拉夫，J 彭津. 结构动力学[M]. 北京：科学出版社，1981.

[8] 孙训芳，等. 材料力学 I [M]. 北京：高等教育出版社，2002.


(上接 338 页)


[4] 李全友，宋方敏，冉勇康，等. 龙门断裂带晚第四纪活动性讨论[J]. 地震地质，2004，26(2)：248-258.

[5] Chien H C, Yih M W, Tzay C, et al. Relocation of the 1999 Chi－Chi Earthquake in Taiwan. TAO, 2000, 11(3): 581-590.

[6] Densmore, Michael Ellis, A L, Li Yong, et al.. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 2007, 26: TC4005, doi:10.1029/2006TT001987.

[7] 邓起东，陈社发，赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质，1994，16(4)：389-403.

[8] 黄缘，吴建平，张天中，等. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定位研究[J]. 中国科学 D 辑：地球科学，2008，38 (10)：1242-1249.

[9] 张瑞青，吴庆举，李永华，等. 汶川中强余震震源深度的确定及其意义[J]. 中国科学(D 辑)，2008，38(10)：1234-1241.

[10] 陈运泰，许力生，张勇，等. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告[R/OL]. 2008. http://www.csi.ac.cn.

[11] 徐锡伟，闻学泽，叶建青，等. 汶川 $M_S$8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质，2006，30(3)：597-629.

[12] 李勇，周荣军，董顺利，等. 汶川特大地震的地表破裂与逆冲－走滑作用[J]. 成都理工大学学报，2008，35(4)：405-413.

[13] 周荣军，李勇，Densmore A L，Ellis M A，何玉林，王凤林，黎小刚. 青藏高原东缘活动构造[J]. 矿物岩石，2006，26(2)：40-51.

[14] Chen S, C J L. Wilson. Emplacement of the Longmen Shan Thrust－Nappe Belt along the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Struct. Geol., 1996, 18: 413-430.

[15] 张彬，杨选辉，陆远忠. 地震动态应力触发研究进展[J]. 西北地震学报，2008，30(3)：299-301.

[16] Li Yong, Zhou Rongjun, Densmore A L, et al.. The Geology of the Eastern Magin of the Qinghai－Tiben Plateau[M]. 北京：地质出版社，2006.

[17] 刘旭宇，姚凯，何新社，等. 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_S$8.0 地震甘肃强震记录与初步分析[J]. 西北地震学报，2008，30(3)：266-269.

[18] 中国地质调查局发展研究中心情报室. 科学家提出汶川地震两阶段模式[EB/OL]. 2008. http://www.cgs.gov.cn.