



# 隔震结构的新产品新技术 研究及应用

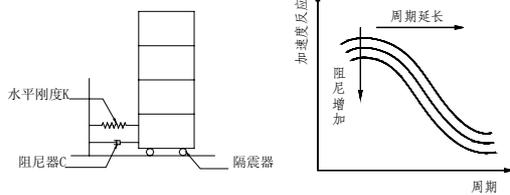
施卫星

## 隔震结构的新产品新技术 研究及应用



- 基础隔震一般原理
- 橡胶支座的性能
- 基础隔震试验研究
- 基础隔震工程应用
- 楼层隔震和层间隔震

## 基础隔震一般原理

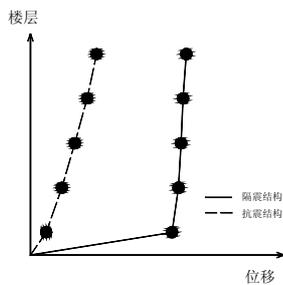


## 基础隔震一般原理



- 建筑结构隔震体系是一种合理、有效、安全、经济的减震体系，它彻底改变了传统结构中采用“强化”结构的抗震方法，而是采用“软化”结构、“以柔克刚”隔离地震的新途径，即在建筑物底部设置水平柔性的隔震装置，使结构软化，降低刚度，延长结构的基本自振周期，从而减小结构的地震反应。

## 基础隔震一般原理



## 基础隔震一般原理



- 利用基础隔震系统延长结构基本自振周期，并给予适当阻尼使结构物的加速度反应大大减弱，并让结构的变形能量主要由隔震系统承担，而不是由结构自身的相对变形承担，因而结构在地震过程中输入的能量很小，为结构物的地震防护提供更好的安全保障。

## 隔震系统应具备的条件



1. 隔震体系能使结构隔震层具有较小的刚度，以使结构体系的自振周期大大延长，远离地震场地的卓越周期，把地面输入震动隔开，有效地降低结构的加速度反应；
2. 隔震体系具有足够的初始刚度，在风荷载或轻微地震作用下结构具有足够的弹性刚度，以满足正常使用要求；

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 隔震系统应具备的条件



3. 隔震体系能够提供较大的阻尼，具有较大的耗能能力，防止隔震体系产生很大的变形，避免结构发生倒塌；
4. 隔震体系具有足够竖向刚度，在任何情况下不至于丧失竖向承载力，以保证结构不会因竖向刚度失效而损坏。

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 基础隔震的优越性



1. 隔震体系明显有效地减轻结构的地震反应。与传统结构相比，一般可以大大减轻结构加速度反应，使上部结构基本处于弹性工作状态，保证结构物的安全，降低了地震作用的不确定性，从而达到“小震不坏，中震可修，大震不倒”的抗震设防要求。
2. 隔震体系使结构的变形主要局限于隔震层，上部结构自身相对变形大大减小，甚至强震时仍保持在弹性范围内，从而使结构及其内容物不受地震灾害的损坏。

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 基础隔震的优越性



3. 隔震体系即使在地震作用后产生较大的永久损坏，它的复位、更换、维修也很方便，只须对隔震装置进行必要的修复，而无须考虑结构物本身的修复，震后可以很快恢复正常生产和生活，具有明显的社会和经济效益。
4. 抗震措施简单明了，减震机理明确。抗震设计只须考虑隔震层的隔震设计，目的明确，无须考虑复杂的抗震节点设计。
5. 基础隔震系统既可以应用于重要建筑物，也可以应用于一般房屋结构；既可应用于新建结构物，也能应用于已有建筑的抗震加固改造。

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 基础隔震研究现状与新进展



- 隔震产品研究开发
  - 普通叠层橡胶支座
  - 高阻尼橡胶支座
  - 铅芯橡胶支座
  - 滑动橡胶支座
  - 组合隔震支座

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 橡胶的发展历史



远在哥伦布发现美洲（1492年）以前，中美洲和南美洲的当地居民已开始使用天然橡胶。人们最初使用的天然橡胶是未硫化橡胶，制成的雨衣、胶鞋等产品在遇到气温高和太阳曝晒时变软、发粘，在气温低时变硬、脆裂，橡胶制品不能经久耐用。1838年，美国人C.Goodyear发现用硫磺粉撒在胶块上，橡胶表面不发粘，变得平滑而有弹性，经过一年多的实验，证明在橡胶中加入硫磺和碱式碳酸铅，经共同加热熔化后，所制出的橡胶制品受热或在阳光下曝晒时，不但不会变软和发粘，而且仍然保持良好的弹性。从此，天然橡胶才真正被确定具有特殊的使用价值，成为一种极其重要的工业原料。

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 橡胶的发展历史



- 由于天然橡胶用量的剧增，英国人开始从巴西引进橡胶种子，并于1876年在斯里兰卡、印度尼西亚、新加坡等试种成功，我国于1904年开始引进巴西橡胶树。目前，世界上主要产胶国有马来西亚、印度尼西亚、泰国、中国、印度、斯里兰卡等国。
- 随着石油化工工业的发展，本世纪初，人们开始研制合成橡胶，1937年，丁苯橡胶开始工业化生产，以后相继有了丁二烯橡胶、乙丙橡胶、氯丁橡胶、丁腈橡胶、丁基橡胶、硅橡胶、氟橡胶、聚胺脂橡胶等问世。

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 工程橡胶的特点



- 工程橡胶的主要特点是工程橡胶应具有与其它建筑材料相同的耐久性，在建筑物的设计寿命内，工程橡胶不应老化、破坏。
- 对工程橡胶的要求一般有物理性能要求和力学性能要求。

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 物理性能



- 物理性能一般取决于胶料的配方和制造工艺。在物理性能方面，工程橡胶要求有较高的强度和变形能力，耐久性，耐臭氧老化等。
- 橡胶的强度一般以下列三个指标来表示：25%定伸应力、300%定伸应力、拉伸强度，变形能力以扯断伸长率表示。提高橡胶强度的有效方法是提高胶料的含胶率，工程橡胶的含胶率一般在60%以上。橡胶的扯断伸长率一般与橡胶的硬度有关，橡胶的硬度越低，扯断伸长率越大。提高橡胶扯断伸长率的方法有胶料的选择，硫化体系的选择、补强剂和填充剂的选择和比例。

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 物理性能



- 耐久性一般通过热空气老化来测定，一般要求老化后的橡胶的性能变化率不超过20%。提高橡胶耐久性的方法一般有胶料的选择、硫化体系的选择、防老化剂的选择。
- 耐臭氧老化性能通过臭氧老化试验来测定，要求橡胶在经过规定臭氧浓度的试验后，表面无龟裂。提高橡胶耐臭氧性能的有效方法是选择胶料、硫化体系和防老化剂。

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

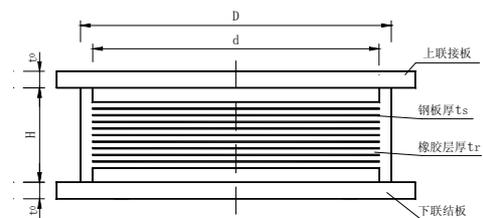
## 力学性能



工程橡胶的力学性能与物理性能有关，橡胶的拉伸强度越高，工程橡胶制品的极限强度越高。工程橡胶的抗压弹性模量与橡胶的硬度和产品的形状系数有关，硬度越高抗压弹性模量越高，形状系数越高抗压弹性模量越高。工程橡胶的剪切模量与橡胶的硬度有关，硬度越高，剪切模量越高。

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 橡胶支座性能



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 橡胶支座性能

- ▣ 橡胶种类：天然橡胶、氯丁橡胶、乙丙橡胶、丁基橡胶
- ▣ 橡胶硬度：30~70度

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20



## 叠层橡胶支座的形状系数

- ▣ 第一形状系数  $S_1$

$$S_1 = \frac{\pi d^2 / 4}{\pi d t_r} = \frac{d}{4 t_r} \quad S_1 = \frac{LB}{2 t_r (L+B)}$$

- ▣ 第二形状系数  $S_2$

$$S_2 = \frac{d}{n t_r}$$

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20



## 叠层橡胶支座的水平刚度

$$k_h = \frac{GA}{T_r} = \frac{GA}{n t_r}$$

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20



## 叠层橡胶支座的竖向刚度

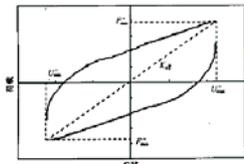
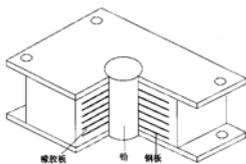
$$k_v = \frac{p}{\delta_v}$$

$$k_v = E_{cV} \frac{\pi D}{4} S_2$$

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20



## 铅芯橡胶支座的性能



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20



## 铅芯橡胶支座的性能

- ▣ 铅芯橡胶支座的等效线性化模型

$$k_B = \frac{A_R G \gamma_e}{u_{Be}} + \frac{A_p q}{u_{Be}}$$

$$h_B = \frac{2Q_d \left\{ u_{Be} + \frac{Q_d}{(k_2 - k_1)} \right\}}{\pi u_{Be} (Q_d + u_{Be} k_2)}$$

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20



## 铅芯橡胶支座的性能



### □ 铅芯橡胶支座的非线性分析模型

$$k_d = k_r \left(1 + \frac{12A_p}{A_r}\right) \quad k_r = k_s \left(\frac{A_r}{A_g}\right)$$

$$k_u = 6.5k_d$$

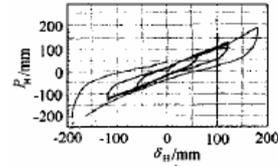
$$F_y = 7.06 \times 10^{-3} D^2$$

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 其他隔震支座的性能



### □ 1) 高阻尼橡胶支座

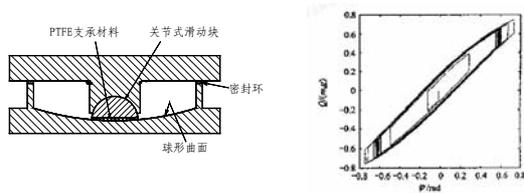


建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 其他隔震支座的性能

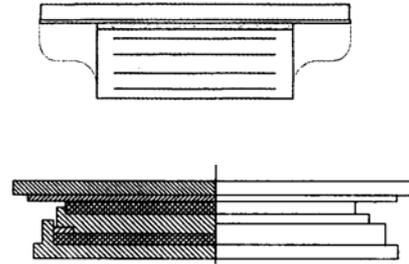


### □ 2) 摩擦摆隔震系统(FPI)



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 其他隔震支座的性能



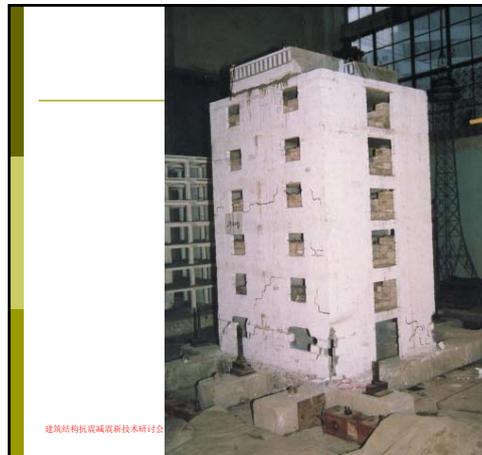
建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 基础隔震试验研究

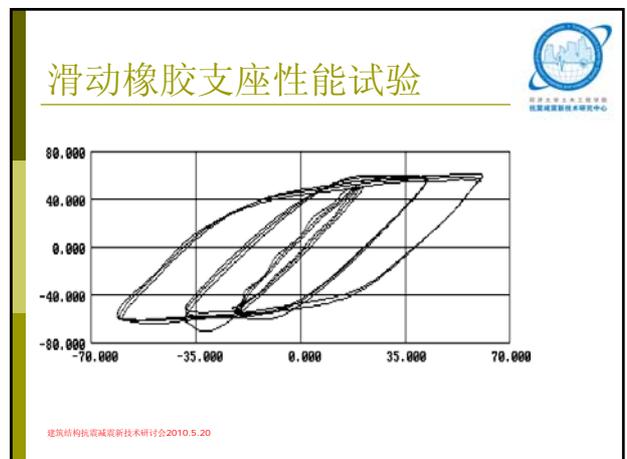
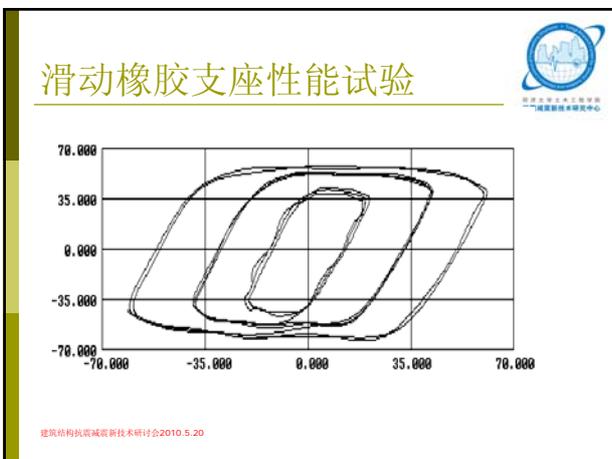
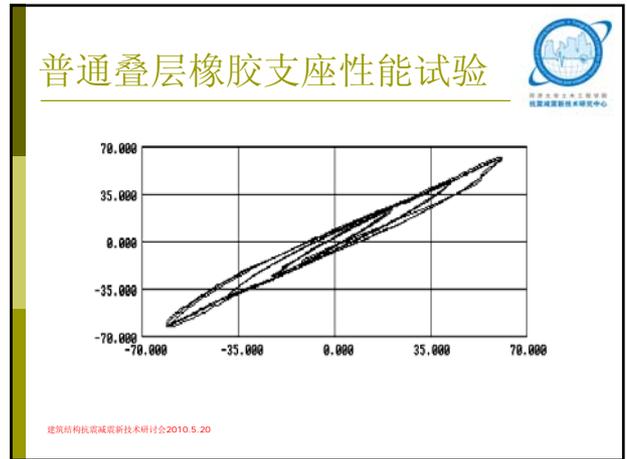
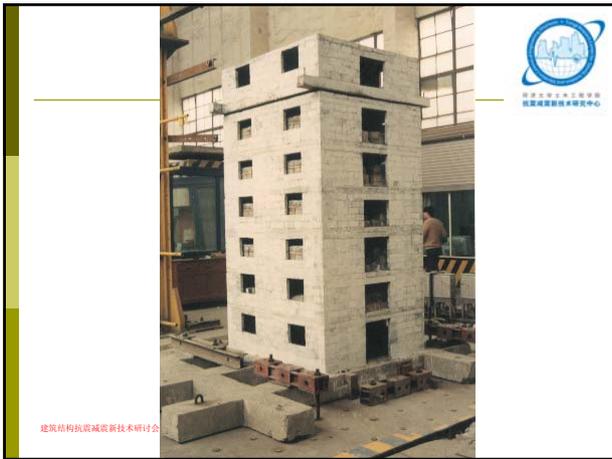


- 1992橡胶支座性能试验
- 1993滑动橡胶支座性能试验
- 1993基础隔震单质点振动台试验
- 1993滑动支座隔震六层砌块房屋振动台试验
- 1993六层砌块房屋层间隔震振动台试验研究
- 1994组和支座性能试验
- 1994六层钢框架结构基础隔震振动台试验
- 1996三层钢筋混凝土框架结构振动台试验
- 1999三层钢框架结构振动台试验
- 2000楼层隔震振动台试验
- 2001铅芯支座性能试验

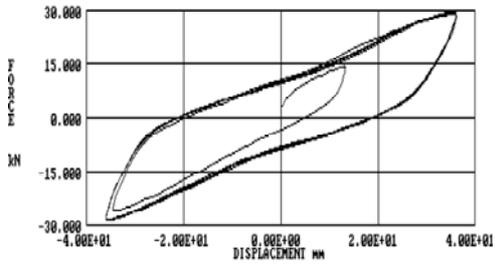
建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20



建筑结构抗震减灾新技术研讨会

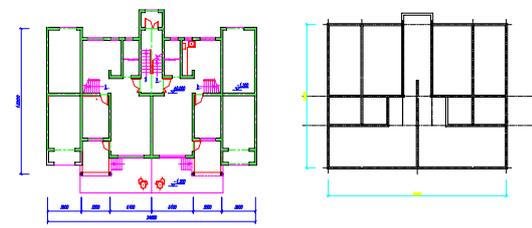


## 铅芯橡胶支座性能试验



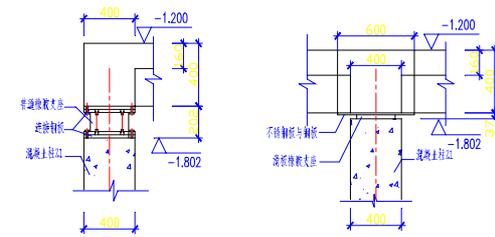
建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 组合支座隔震工程应用



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 组合支座隔震工程应用



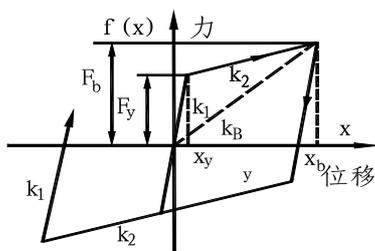
建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 组合支座隔震工程应用

- 叠层橡胶支座
  - $\Phi 300 \times 122$
  - 中层橡胶5mm
  - 钢板2mm
- 滑动橡胶支座
  - $300 \times 300 \times 28$
  - F4 2mm
  - 中层橡胶5mm
  - 钢板2mm

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 组合支座恢复力模型



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 组合支座隔震工程应用



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 组合支座隔震工程应用



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 组合支座隔震工程应用



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 组合支座隔震工程应用



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 组合支座隔震工程应用



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 组合支座隔震工程应用



建筑结构抗震减灾

## 组合支座隔震的特点



- 组合橡胶支座隔震性能优越
- 组合橡胶支座隔震造价低
- 组合橡胶支座隔震适合于各种类型的场地

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 楼层隔震工程应用—— 上海证券交易所卫星通讯地球站



- 铅芯橡胶支座——大位移时的稳定问题
- 机械装置隔震——日常维护问题
- 最终选择——组合支座隔震

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 工程概况 面积：16672m<sup>2</sup>，三层框架，局部四层



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 上海证券交易所楼层隔震工程要求



- 抗震设防烈度：8度
- 场地土类别：IV类
- 隔震地板面积：617m<sup>2</sup>，分成7块
- 隔震效果：<0.2g（楼面输入0.6g）
- 承载能力：4.5kN/m<sup>2</sup>
- 使用寿命：大于30年

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 楼层隔震示意



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 滑动型橡胶隔震支座



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 安装就位的滑动型橡胶隔震支座



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 普通型橡胶隔震支座



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 安装就位的普通型橡胶隔震支座



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 机房楼层隔震示意



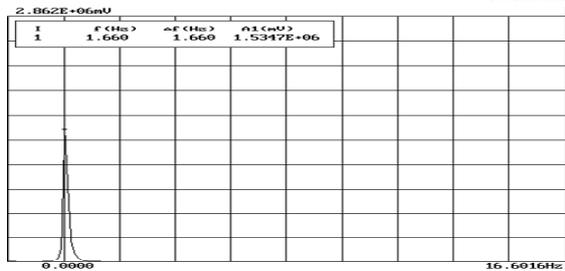
建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 楼面隔震装置振动台试验



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 隔震系统功率谱



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 楼面隔震装置自振周期



滑移前自振周期		滑移后自振周期	
设计	实测	设计	实测
0.69s	0.60s	1.87s	1.46s

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 楼面隔震装置隔震效果



- 输入：587gal
- 输出：92gal
- 隔震效果：84.3%

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 组合支座楼层隔震装置优点



- 隔震效果优越，达50%~80%
- 受力稳定性好，大位移时不失稳
- 耐久性大于60年
- 造价经济

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 隔震地板现场安装



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 建成的隔震机房



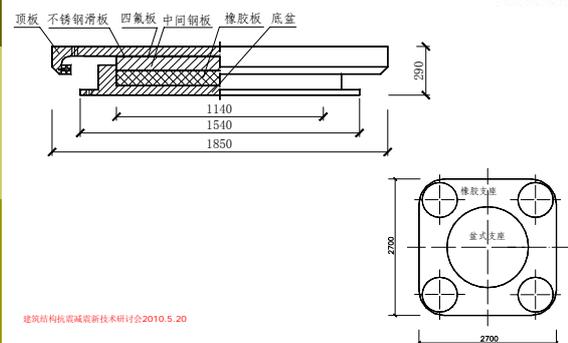
建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 上海F1赛车场高位隔震



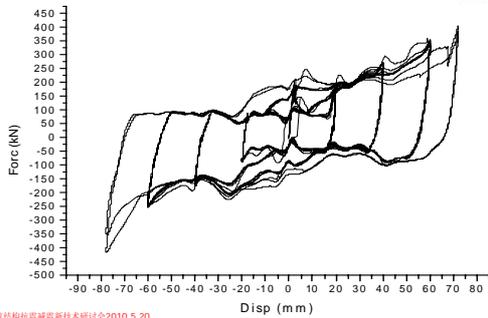
建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 隔震支座示意

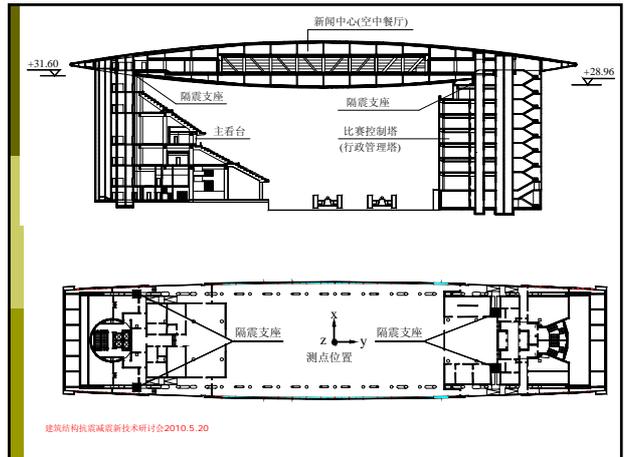


建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 支座滞回特性



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

## 上海F1赛车场高位隔震效果

- 1、可以实现将温度应力从15500kN锐减至约500kN。
- 2、位移反应可减小46~66%；
- 3、顶部楼层加速度减小约45%；
- 4、桁架加速度减小67~76%；
- 5、基底剪力可减小40~45%。
- 6、支座具有较好的耗能性能，等效粘滞阻尼系数约为0.20~0.30。

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20



## 安装就位的支座



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20



## 杨思路427号建筑基础隔振

### 1. 现场测试概况

- 两次测试时间为2009年12月10日和2010年4月9日；
- 分别在隧道内源强和427号原有建筑内布置共11个测点，每个测点同时测试3个方向加速度记录；



现场测站情况



V01测点情况

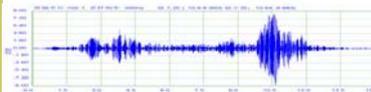
建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20



## 杨思路427号原有建筑振动分析

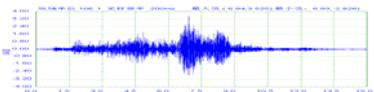
### 2. 振动测试结果

- 先后两次测试底层输入加速度最大值分别为88.83 gal和35.25 gal，对应的上部结构最大振级分贝值为93.33 dB和83.54 dB，均超过规范限值；



左图为第一次测试最大底层输入加速度记录 (纵轴单位为10gal)

右图为第二次测试最大底层输入加速度记录 (纵轴单位为10gal)



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20



## 杨思路427号原有建筑振动分析



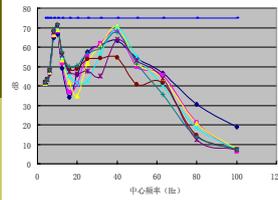
### 3. 拟建建筑振动分析

- 利用第二次测试得到的加速度时程记录作为输入，进行拟建建筑的时程分析，得到各楼层的加速度响应和相应的分贝值；
- 计算工况信息如下表所示：

工况编号	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况6
隔振目标频率 (Hz)	16	13	11	10	10	8
阻尼比	0.05	0.05	0.05	0.05	0.02	0.05

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

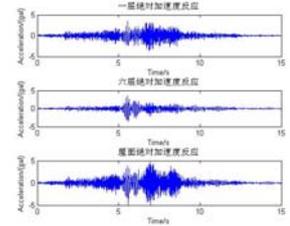
## 杨思路427号原有建筑振动分析



左图为工况4隔振后各楼层反应

右图为工况4加速度响应时程记录 (纵轴单位为gal)

建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20

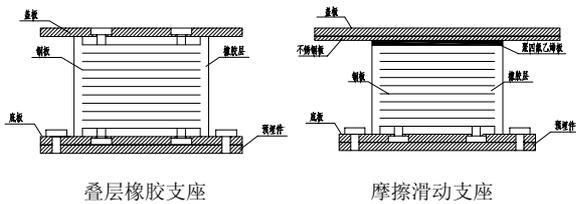


## 杨思路427号拟建建筑隔振支座设计



### 4. 拟建建筑隔振支座设计

- 采用叠层橡胶支座和摩擦滑动支座组合的隔振方式
- 水平方向隔地震，竖向隔地铁引起的振动
- 两种隔振支座如下图所示



建筑结构抗震减灾新技术研讨会2010.5.20