题　　目

结构抗震隔震及消能减震的设计和个案分析

(Anti-Seismic, Isolation and Energy Dissipation)

----建造强地震中安全的房屋----

周福霖
广州大学 工程抗震研究中心
广州大学 建筑设计研究院
减震控制及结构安全 国家重点室 培育基地

2009. 02. 11

主要内容

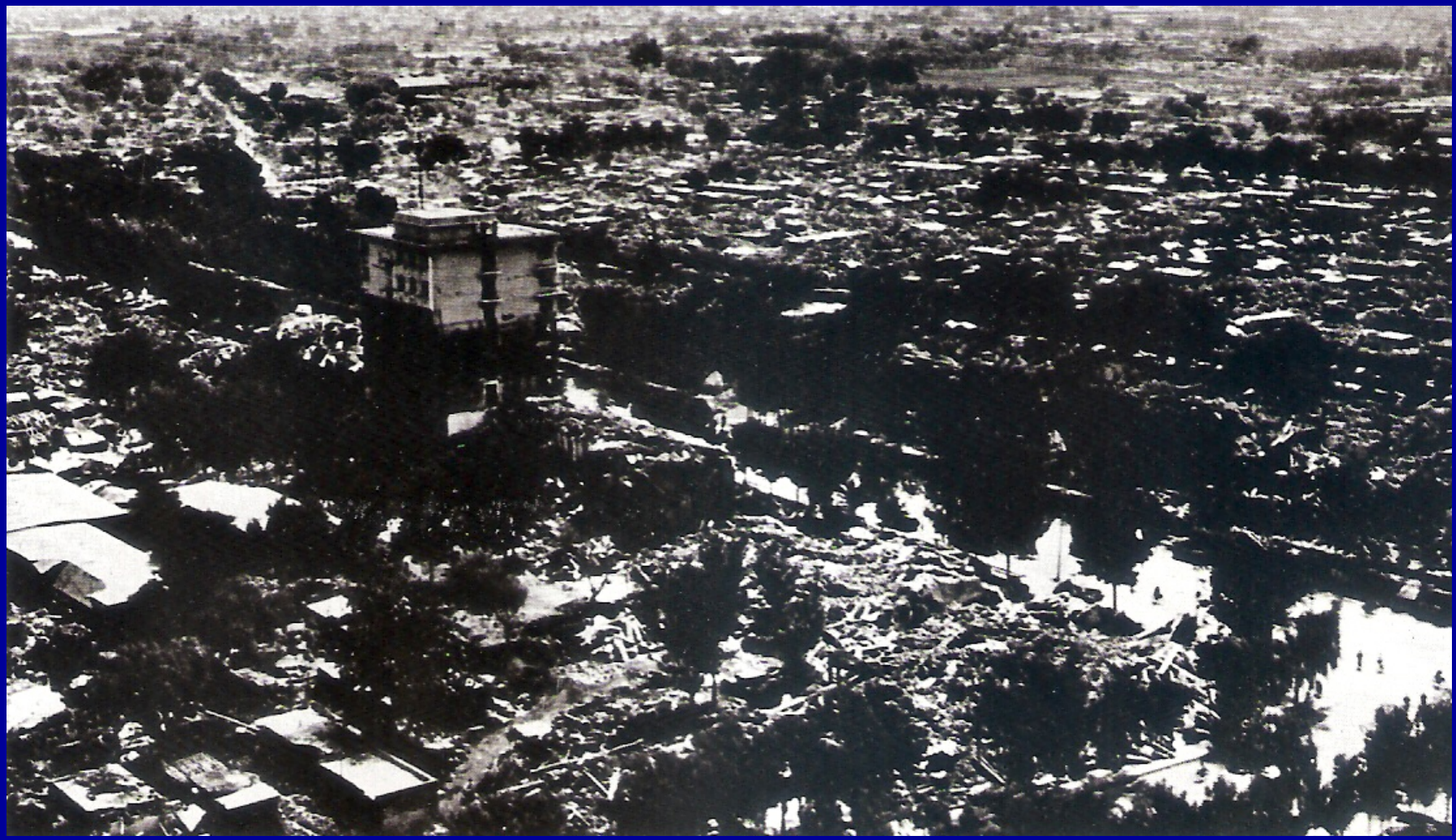
1. 512汶川地震的教训和启示
2. 抗震技术的发展
3. 隔震技术概论

   概念，理论，试验，规程，设计应用，地震考验
4. 隔震设计及个案分析
5. 消能减震技术概论
6. 抗震 消能减震 隔震 的对比分析和应用
7. 隔震在 512地震灾后重建中的最新应用

1. 汶川地震的教训和启示

唐山地震大灾难 1976.7.28 3:43 死亡 24万人

唐山 新华旅馆 倒塌



唐钢 中学教学楼 倒塌

唐山开滦煤矿 总医院 倒塌

摘自“唐山大地震震害”序言(刘恢先)

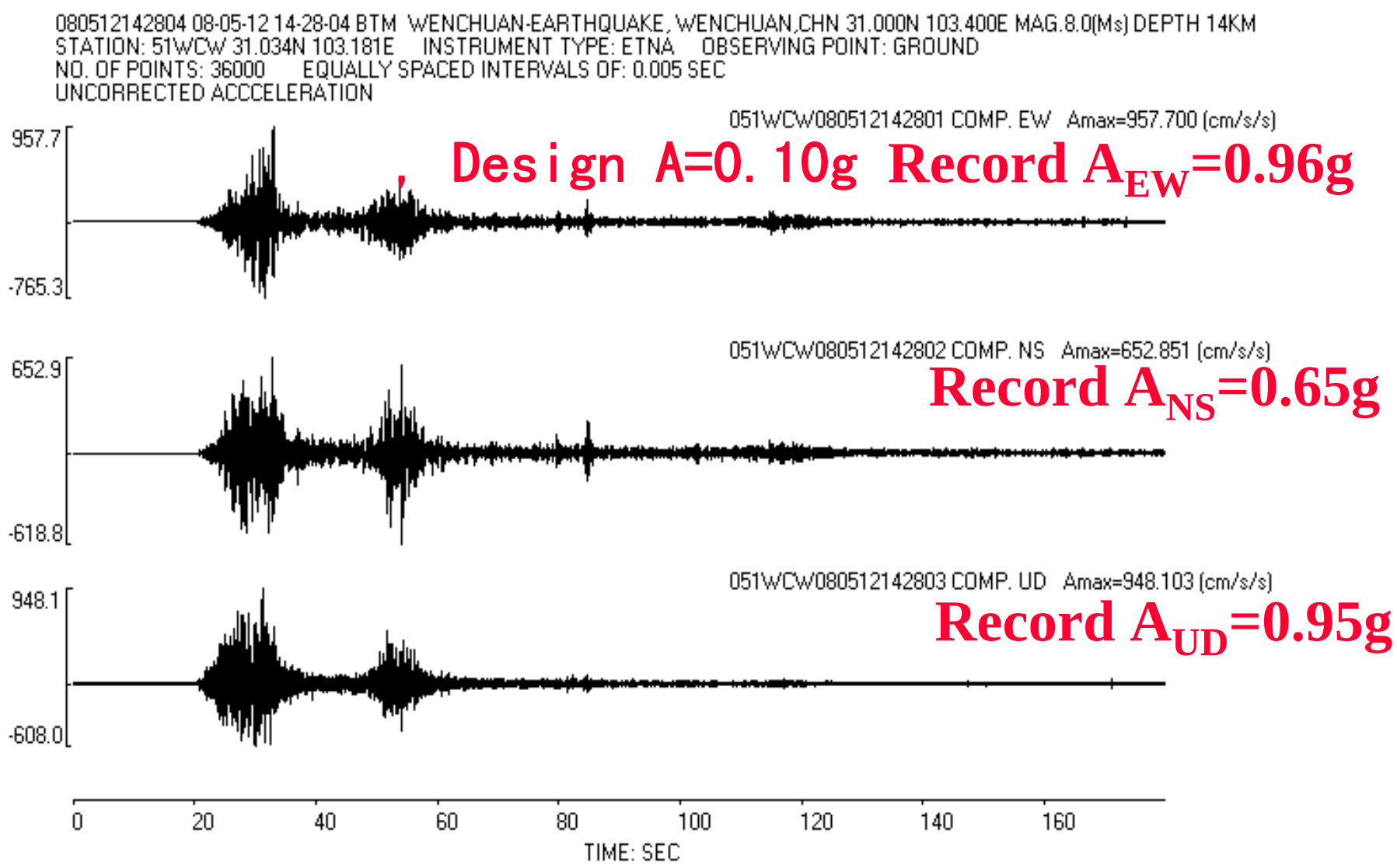
- 房屋成片倒塌,导致灾难:“唐山地震最为触目惊心的震害是极震区各类建筑物普遍倒塌,人员伤亡”
- 设防烈度不准:”失误来自对唐山地震危险估计不足…目前的科学水平还不能准确预测未来的地震危险…. ”
- 要考虑更高烈度(新技术):“工程设计必须考虑如何留有适度的安全余地…预防在意外的高烈度下建筑物倒塌是十分必要的. . ”
- 要双保护(新技术):“公用设施的瘫痪在很大程度上是由于房屋倒塌,伤及内部设备和工作人员…. 不能吝惜对房屋抗震的投资,忽视对人员和设备的保护”
- 异常区:“唐山地震在烈度分布上出现一些异常区,. . . 在震中的低烈度区. 天津的高烈度区…值得深入研究”

汶川地震

四川汶川县发生7.8级地震
8.0
5月12日
据国家地震台网重新核定
北京
成都
北京时间
5月12日14时28分
四川汶川县
北纬 31度
东经 103.4度
震级 7.8
王永卓 编制 新华社发

Records of Wenchuan EQ 20080512

震中距18KM, 汶川卧龙台



512地震后 汶川县城成一片废墟

512地震

房屋破坏 4 种情况

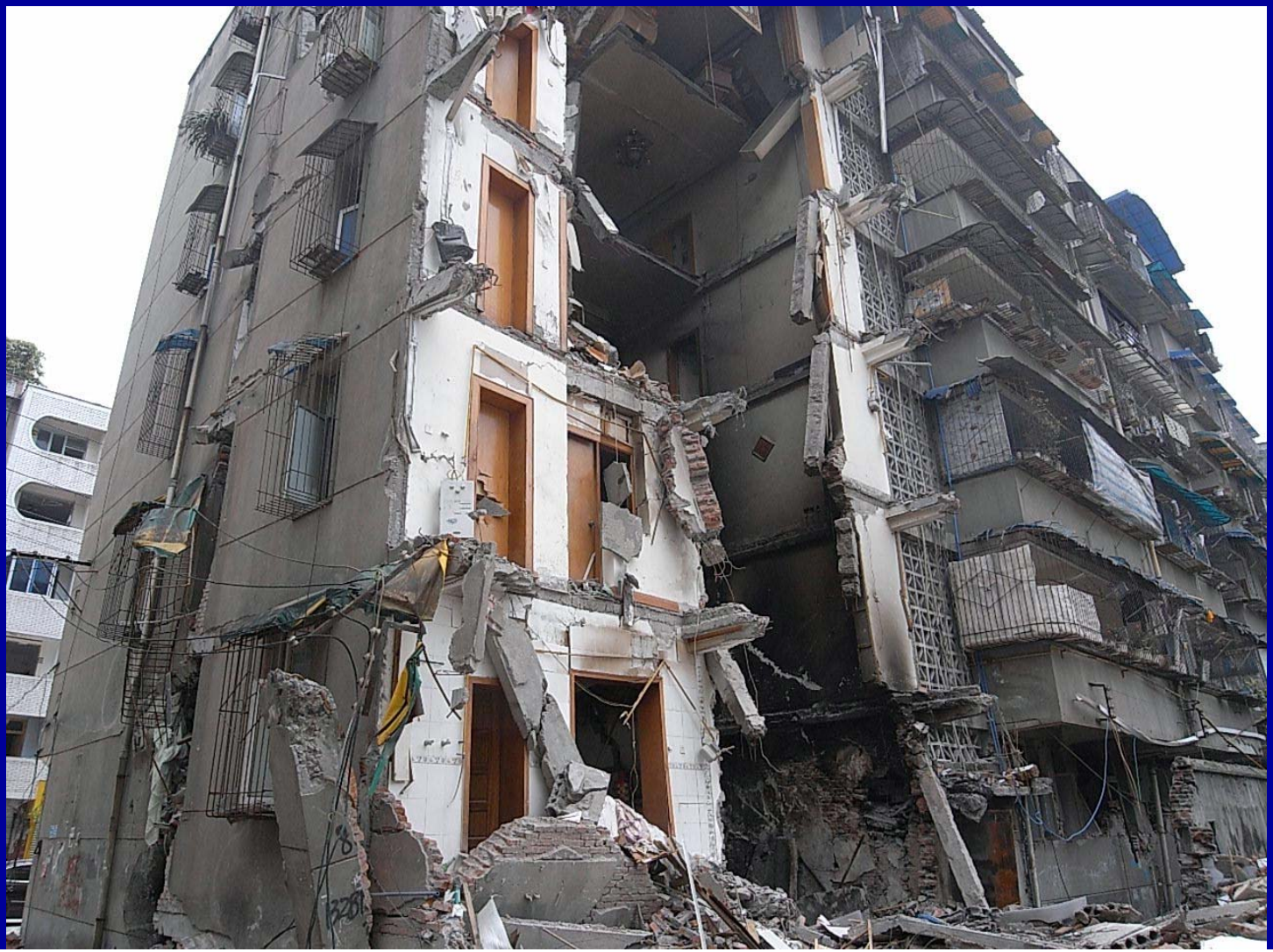
房屋破坏 4 种情况 之一

情况1：房屋整体倒塌

512地震 房屋破坏 4 种情况 之二

情况 2：房屋局部倒塌

（框架住宅，近年建造，破坏严重，局部倒塌）



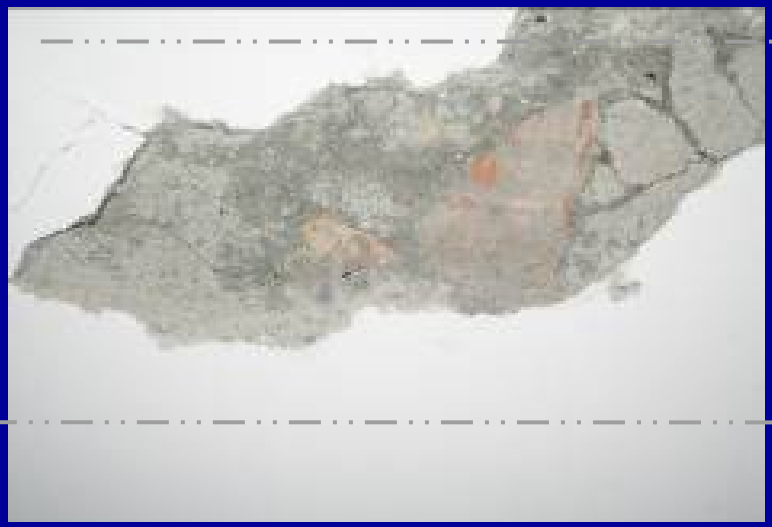
都江堰
商住楼

512地震 房屋破坏 4 种情况 之三

情况 3:房屋受损,貌似完好,但很难修复

主体结构破坏轻微,但装修严重破坏,修复难

高层框架结构
但装修严重破坏,修复难



近年建造,内部装修惨重破坏,很难修复

512地震 房屋破坏 4 种情况 之四

情况4：房屋完好，内部设备仪器摔倒，功能中断

生命线系统：医院，机场，政府指挥中心，救灾指挥中心，消防，电讯，电视大楼，交通枢纽，城市瘫痪，救灾受阻，损惨重失

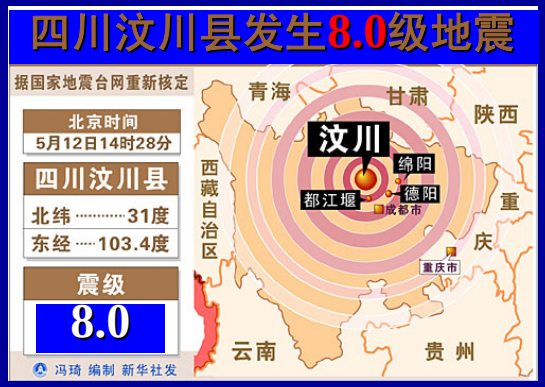
1 机场控制塔，供电系统，调度中心地震中振动摇摆剧烈，仪表、控制设备损坏

2. 震后机场关闭17小时，损失极大，后果严重.

房屋破坏 4 种情况

都会导至:

- 房屋倒塌, 人员大量伤亡
- 房屋虽未倒, 但内部设备仪器甩倒, 功能中断, 瘫痪
  医院瘫痪:加重人员伤亡
  城市瘫痪:政府指挥中心, 通信, 机场, 车站, 银行....
- 房屋虽未倒, 但破坏严重, 难以修复, 大部份要重建
  经济损失大,
  对社会安定和人民生活影响极大



汶川地震大灾难2008.05.12

“我们能不能住上大地震时安全的房子 ？！”

汶川地震 20080512 武都县 隔震房屋

甘肃武都县（地面加速度 0.18 g ）
3栋 砌体结构 6 层隔震房屋，表现良好：
隔震房屋： 1. 房屋振动缓慢
震动周期T=2.4秒，加速度0.18g×0.3=0.05g
2. 屋中家具、花瓶等完好
3. 墙体无裂缝

512地震　甘肃陇南 武都县 一般抗震房屋

非隔震房屋：1. 房屋振动激烈
震动周期T=0.5秒,加速度 0.18g×2=0.36g
2. 屋中家具, 花瓶, 电器等 倾倒
3. 墙体开裂

汶川大地震的经验教训

（1）要承认目前 地震予测存在不确定性，设防烈度偏低（汶川）

我国灾难性大地震，多发生在低烈度区，房屋成片倒塌

1966 刑台地震， 6 度 → 10度

1975 海城地震， 6 度 → 9～10度

1976 唐山大地震 6 度 → 11度，历史上无大地震

1995 日本神户 属“低烈度安全”区，0.3g → 0.6g

（80年来相对平静，千年未遇大地震）

2007.5.12 汶川地震 6，7度 → 9，10，11度

既要满足“按烈度设防”，也要着重于防御突发性的大地震。

（2）提高建筑结构的抗震安全标准，我国结构安全度低20-30%

地震中人的伤亡，90%是房屋倒塌造成（中国房屋倒塌多）

（3）学校，医院，指挥中心，电信等，安全双保护，学校可建成避难所.

（4）农村乡镇房间抗震性能，要足够关注

（5）采用有效，成熟的结构隔震减震等技术，建成避难所

提高设防标准,或采用隔震技术，建造强地震中不倒的房屋，

期望在中国 终止 一次又一次 重复的地震大灾难!

2. 抗震技术的发展

工程结构耐震技术的演变与发展

结构地震反应“放大器”

---工程结构破坏，倒塌

---建筑内装修，设备，仪器的破坏

1. 刚性结构

   避免“放大”， 不经济 不现实

2. 柔性结构

   降低“反应”，风，小震下晃动

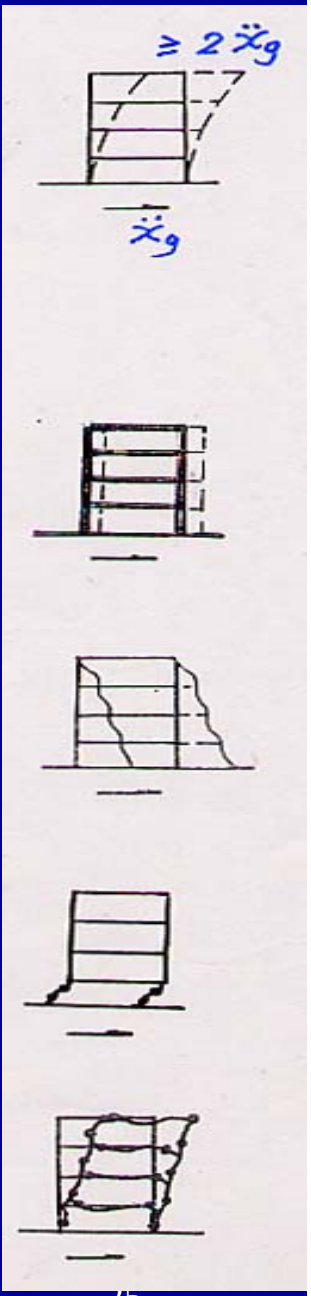
3. 底层柔性（上刚下柔）

   降低上部“反应”

   底层变形集中， P-△ 效应，倒塌

4. 半刚半柔结构

   目前传统应用，存在问题



结构传统抗震设计 设防目标和效果

设防目标--- 小震不坏,
设计烈度可修（容许损坏）
大震不倒

(1) 按“基本烈度” 设计, 只要不超过大震,
一般不致倒塌.
(2) 容许“基本烈度”下损坏, 震后再修复,
减少伤亡
(3) 以抗为途径, 加大断面. 配筋, 已成传统技术习惯
但也存在一些问题

结构传统抗震设计 存在问题

(1) 安全问题：基于地震予测予报“基本烈度”，不过关，不准确

若突发强地震，结构不安全，可能严重破坏或倒塌！

(2) 适应问题：只考虑保护结构，未考虑保护房屋内部 设备，仪器

生命线工程（指挥中心，网络，医院，电台，水，电）破坏.

功能中断，可能导致更大损失

(3) 经济问题：硬抗地震，增大断面，配筋，造价高，有时效果不佳

7度增加 3-8%,

8度增加 10-25%,

9度增加 20-40%

(4) 建筑设计复杂导破坏：难以解决

不规则平面---扭转破坏，

不规则立面---层间剪切破坏

建造强地震中安全房屋的技术对策

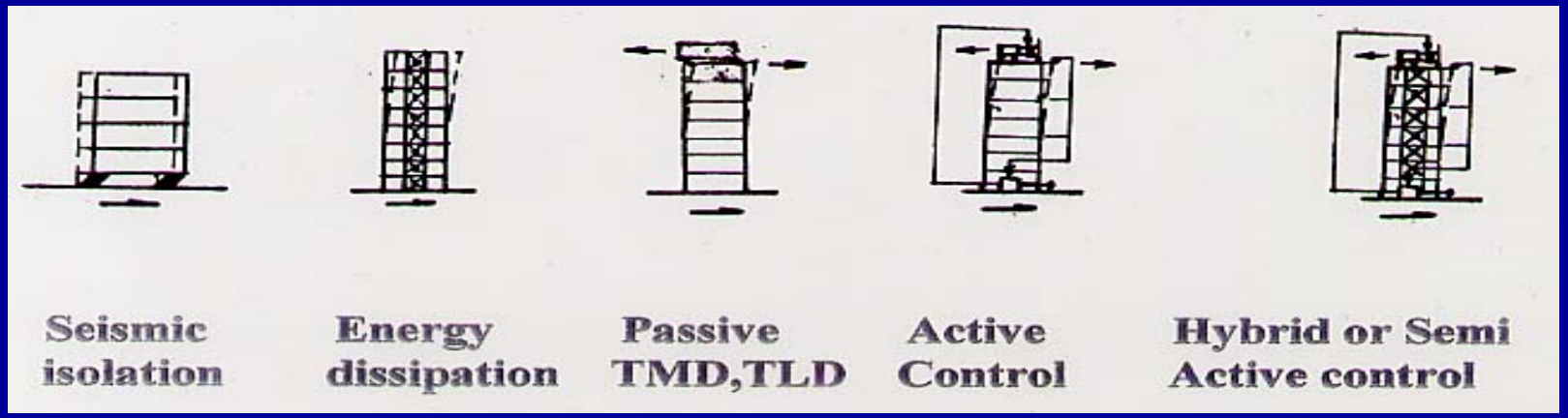
◎安全(突发超烈度强地震，不坏，不倒)

◎适用(保护结构及非结构构件、装修及设备仪器)

◎经济(不太贵)

新技术方法：结构减震控制

隔震　消能减震　调谐减震　主动控制　半主动混合控制



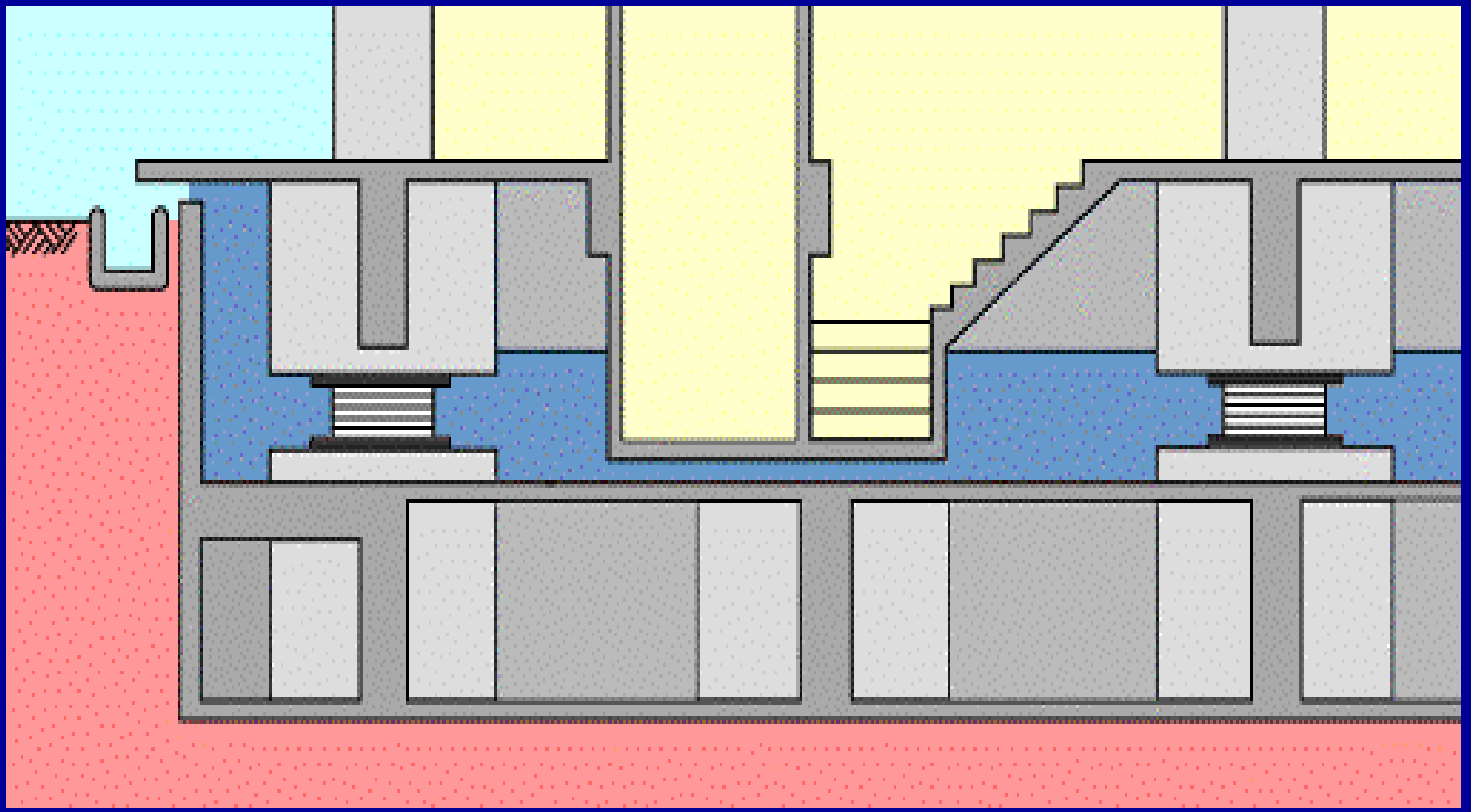
3. 隔震技术概论

概念，理论，试验，规程，设计应用，地震考验

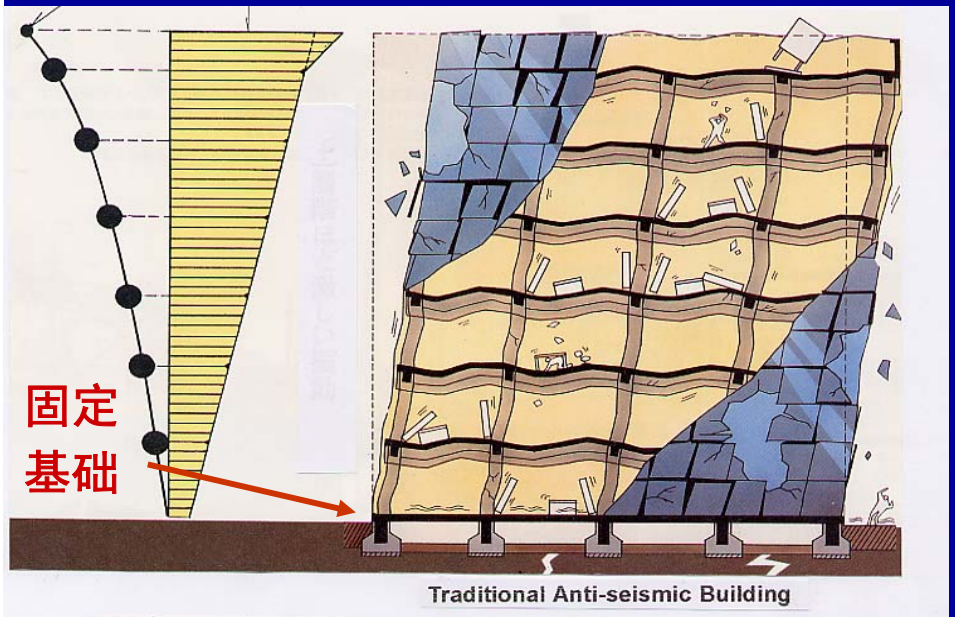
隔震概念

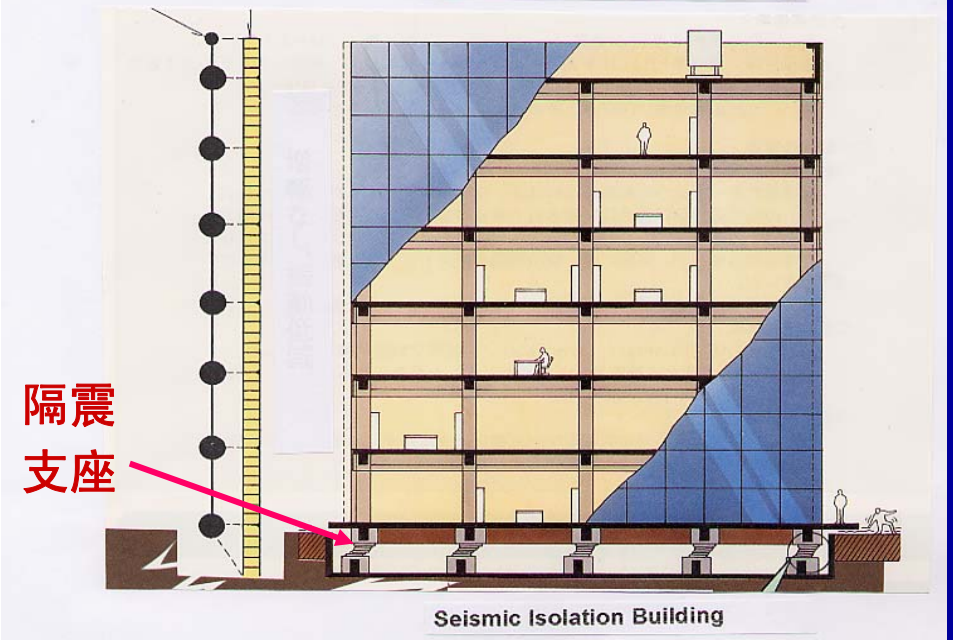
水上的船，不怕地震

(M) 隔震建築基本原理



隔震结构 隔震机理 地震中表现





传统房屋

地震时 激烈晃动

房屋加速度放大

100% → 250%

梁柱裂，内部装饰,设备破坏

隔震房屋

地震时 缓慢平动(长周期)

房屋加速度减少

100% → 40%

结构弹性(变形集中在柔软支座)

保护结构 和 内部装饰,设备

隔震/不隔震=1/6

结构隔震减震机理—对比

技术原则对比:

传统抗震	隔震
概念：加强构件	调整结构动力参数(柔软层, 变形集中)
途经：硬抗地震	隔离能量传递(以柔克刚)
目标：可坏, 不倒	不坏, 处于弹性
保护对象：仅结构	结构及内部 装修及设备仪器(双保护)
设计：强度, 刚度	强度及 反应控制

隔震理论

建立 不同隔震结构 计算模型 并和试验结果对比

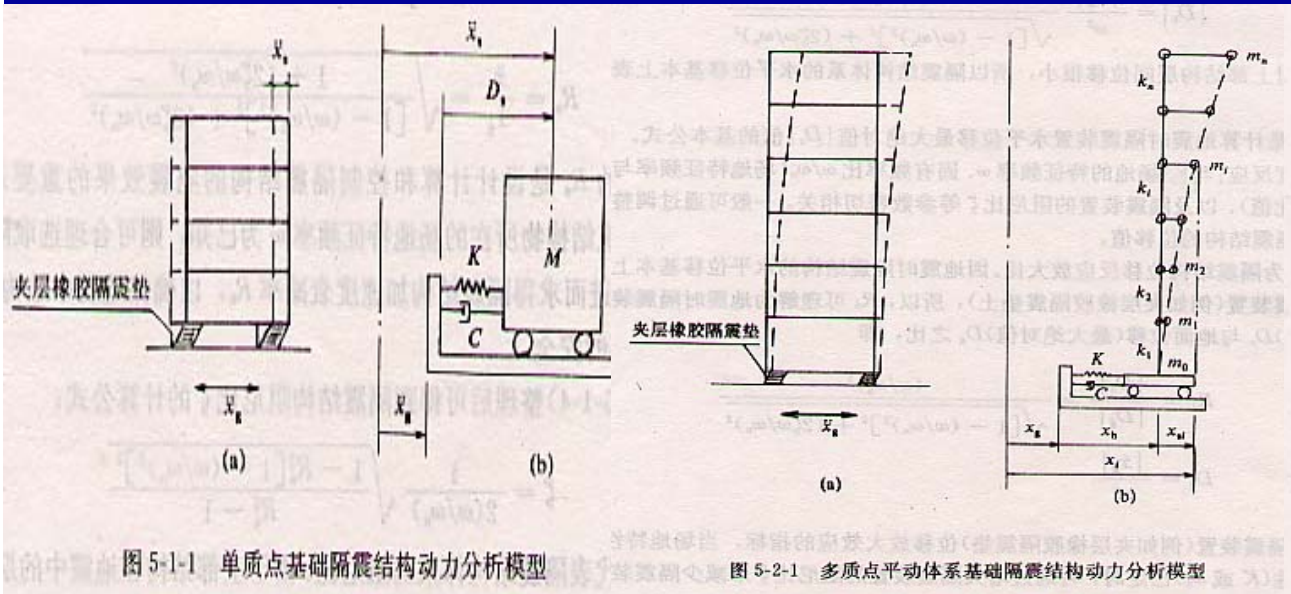


图 5-1-1 单质点基础隔震结构动力分析模型

图 5-2-1 多质点平动体系基础隔震结构动力分析模型

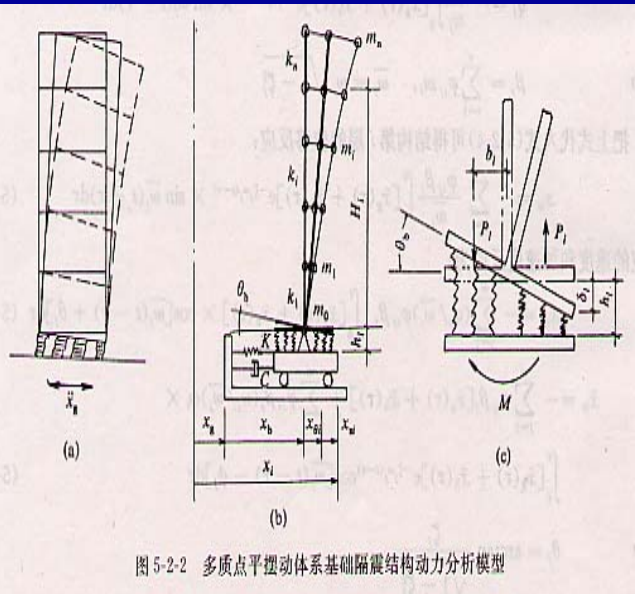


图 5-2-2 多质点平摆动体系基础隔震结构动力分析模型

单自由度
结构水平剪切
简单模型

多自由度
结构水平剪切，弯曲
较复杂模型

多自由度
结构水平剪切，弯曲
隔震支座拉压
较复杂模型

隔震体系结构动力反应分析及控制计算（1）
Seismic Isolation-Dynamic Analysis

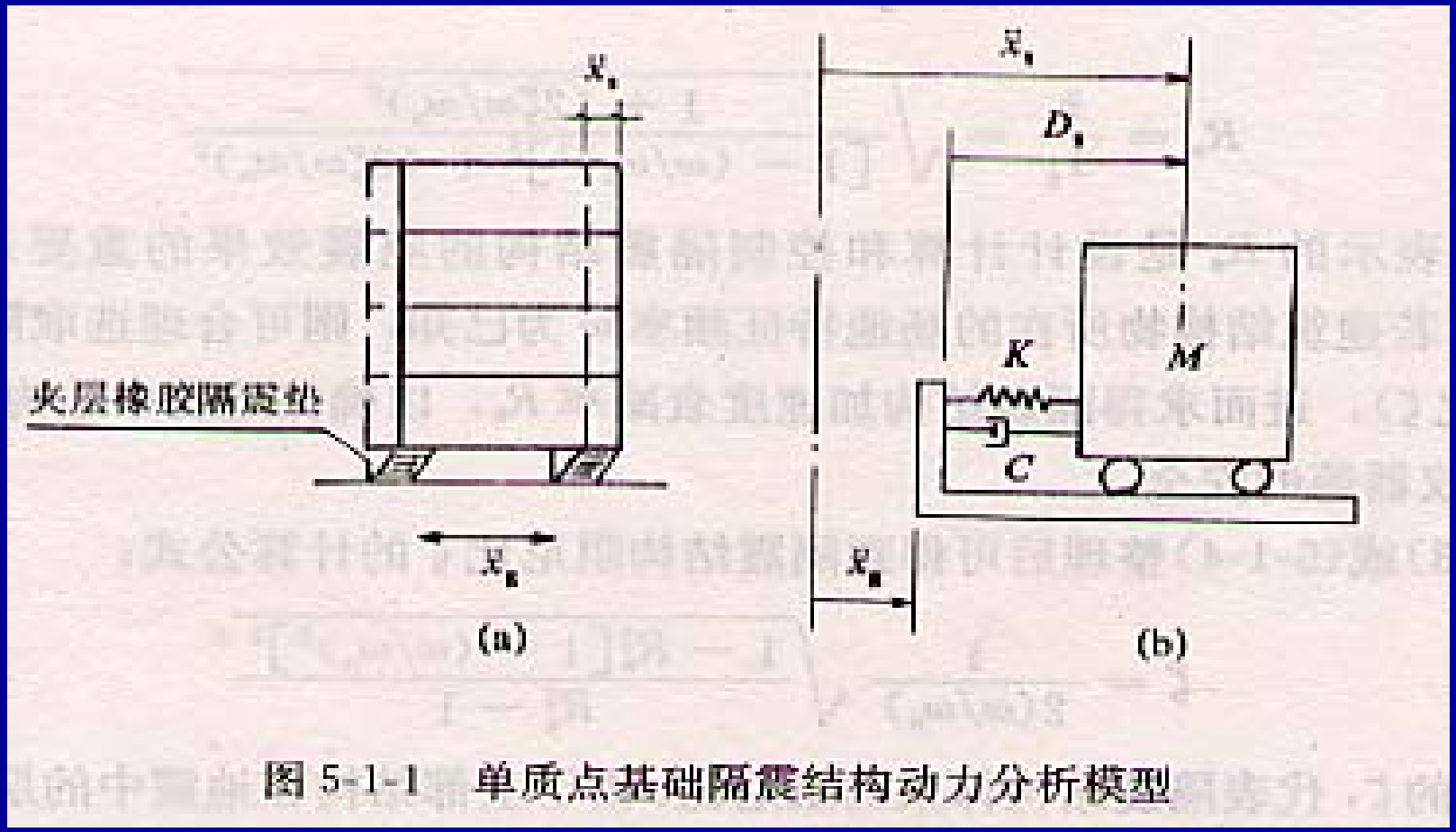


图 5-1-1　单质点基础隔震结构动力分析模型

Model of Single degree of freedom of isolation structure

隔震体系结构动力反应分析及控制计算（2）

Seismic Isolation-Dynamic Analysis (2)

$$M\ \ddot{x}_s + C\ \dot{x}_s + K\ x_s = C\ \dot{x}_g + K\ x_g$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}} \qquad \zeta = \frac{C}{2M\omega_n}$$

$$\ddot{x}_s + 2\zeta\omega_n\dot{x}_s + \omega_n^2 x_s = 2\zeta\omega_n\dot{x}_g + \omega_n^2 x_g$$

$$Ra = \frac{\ddot{x}_s}{\ddot{x}_g} = \sqrt{\frac{1+(2\zeta\omega/\omega_n)^2}{[1-(\omega/\omega_n)^2]^2+(2\zeta\omega/\omega_n)^2}}$$

$$\zeta = \frac{1}{2(\omega/\omega_n)}\sqrt{\frac{1-R_a^2[1-(\omega/\omega_n)^2]^2}{R_a^2-1}}$$

$$R_D = \frac{|D_s|}{|D_g|} = \frac{(\omega/\omega_n)^2}{\sqrt{\left[1-(\omega/\omega_n)^2\right]^2+(2\zeta\omega/\omega_n)^2}}$$

结构地震反应 放大系数 Ra –频率比 的 关系

传统结构 水平刚度大

频率比 ω / ω n =0.8～1.5

地震动放大系数 Ra

Ra=2 ～3

隔震结构 水平刚度小（柔性支座）

频率比 ω / ω n =3～8

地震动放大系数 Ra

Ra= 1/2～1/8

隔震结构 / 传统结构：

理论： Ais/Afs=1/4 ～ 1/12

试验： Ais/Afs= 约 1 / 8.6

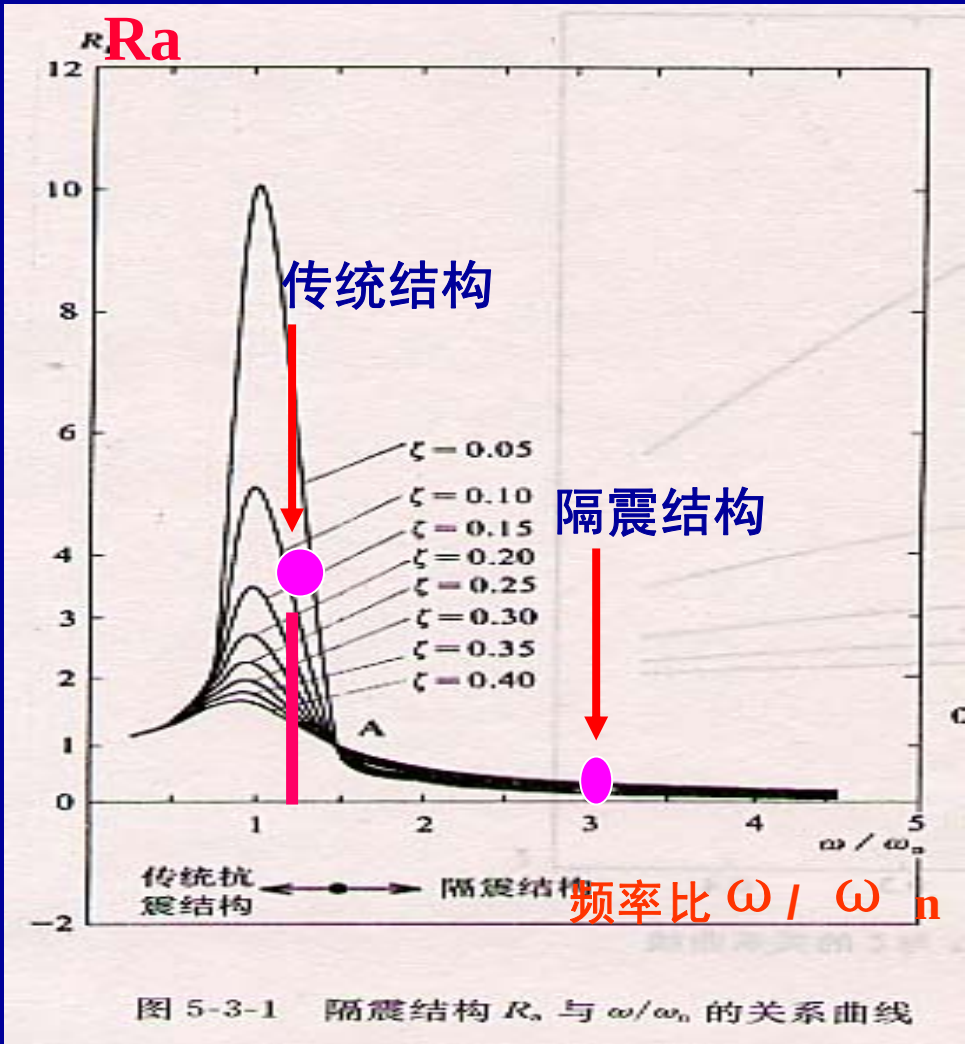
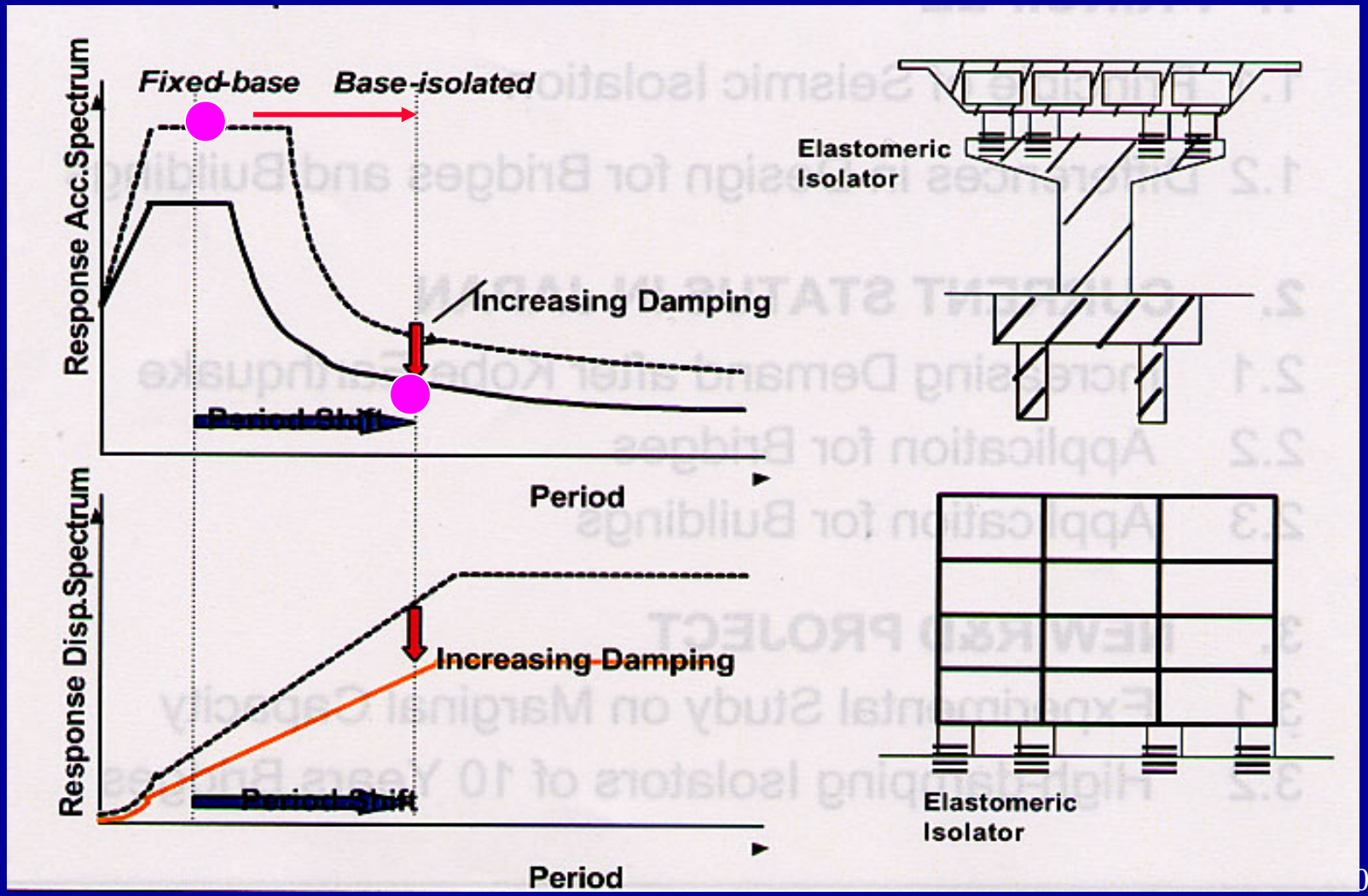


图 5-3-1 隔震结构 R_β 与 ω/ω_n 的关系曲线

房屋 桥梁 隔震机理

结构反应 230%→40%



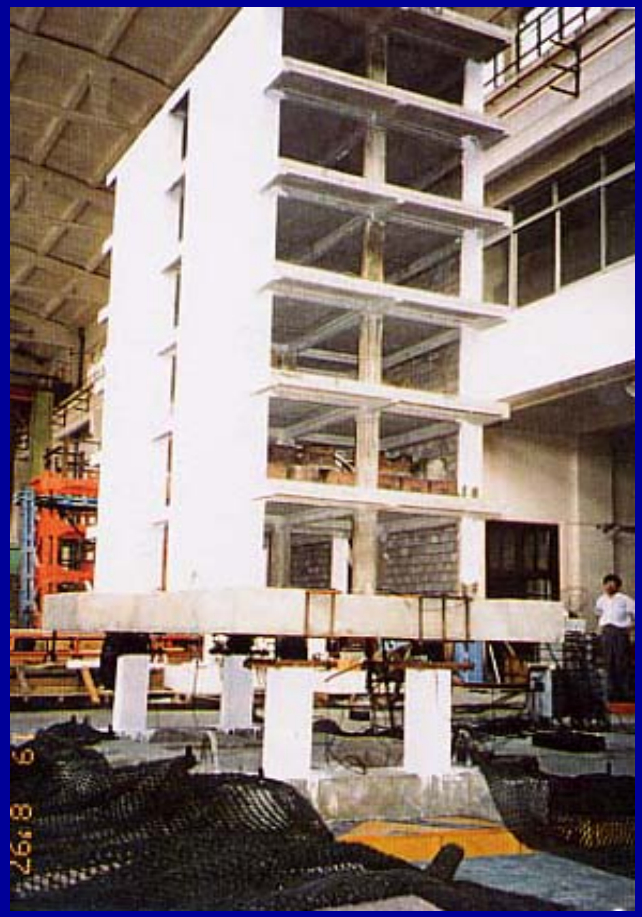
隔震试验

(M)实录Iso.Hi.隔震房屋 加速度　振动台试验

隔震结构振动台试验

Seismic Isolation-Shaking table tests

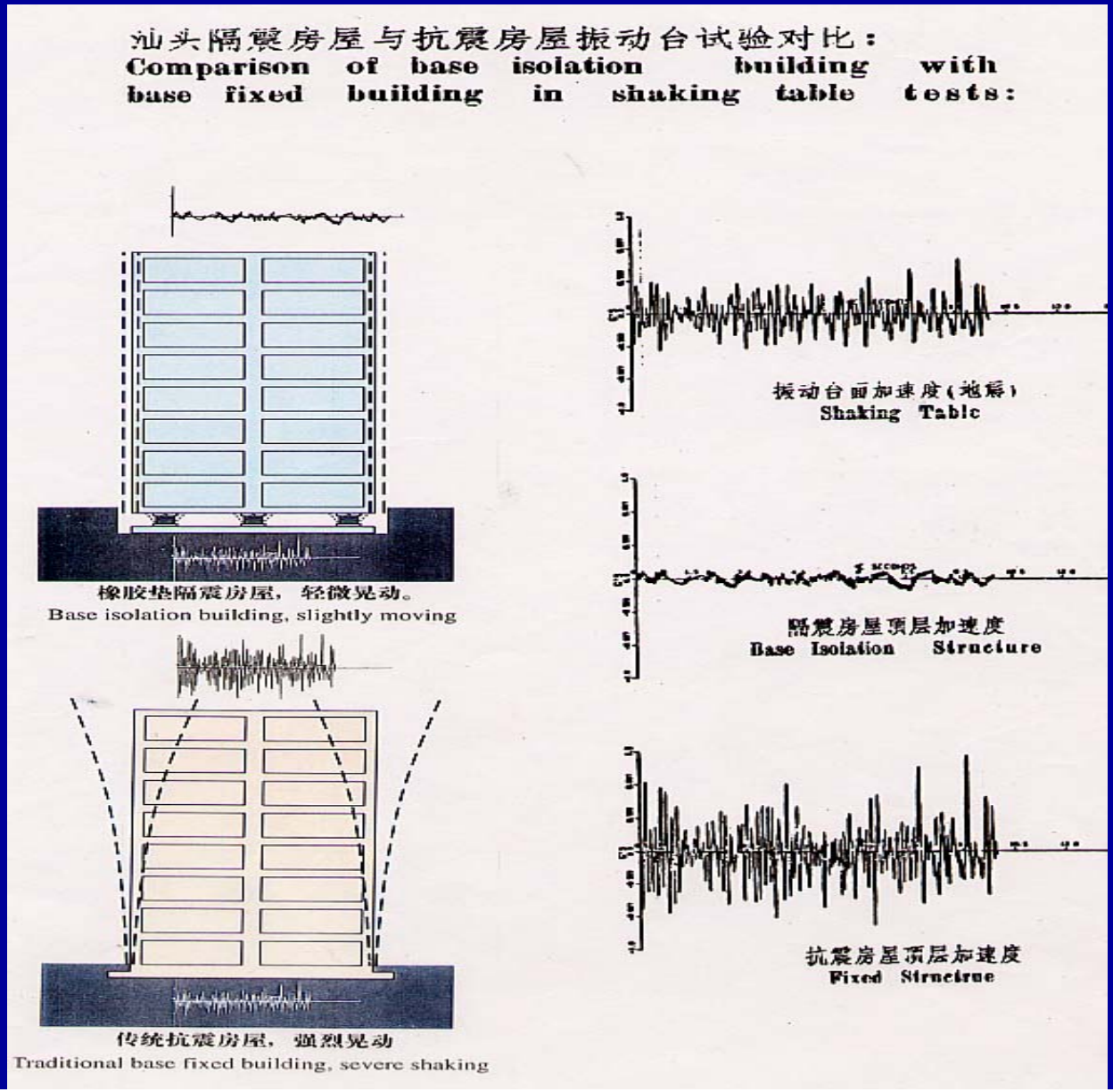
1996 华南建设学院(广州大学)
基底隔震



1997 广州大学
首层顶隔震

隔震结构振动台试验(总结)

Seismic Isolation-Shaking table tests

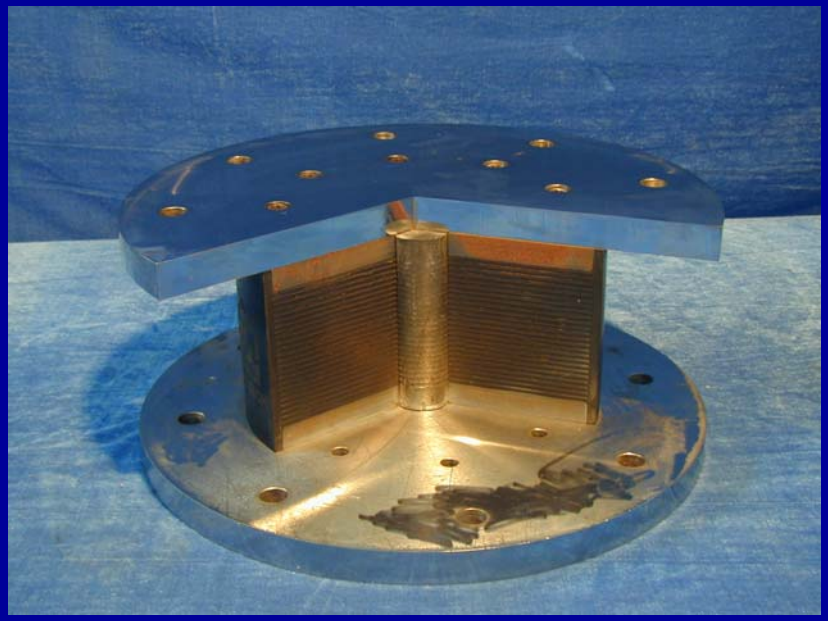


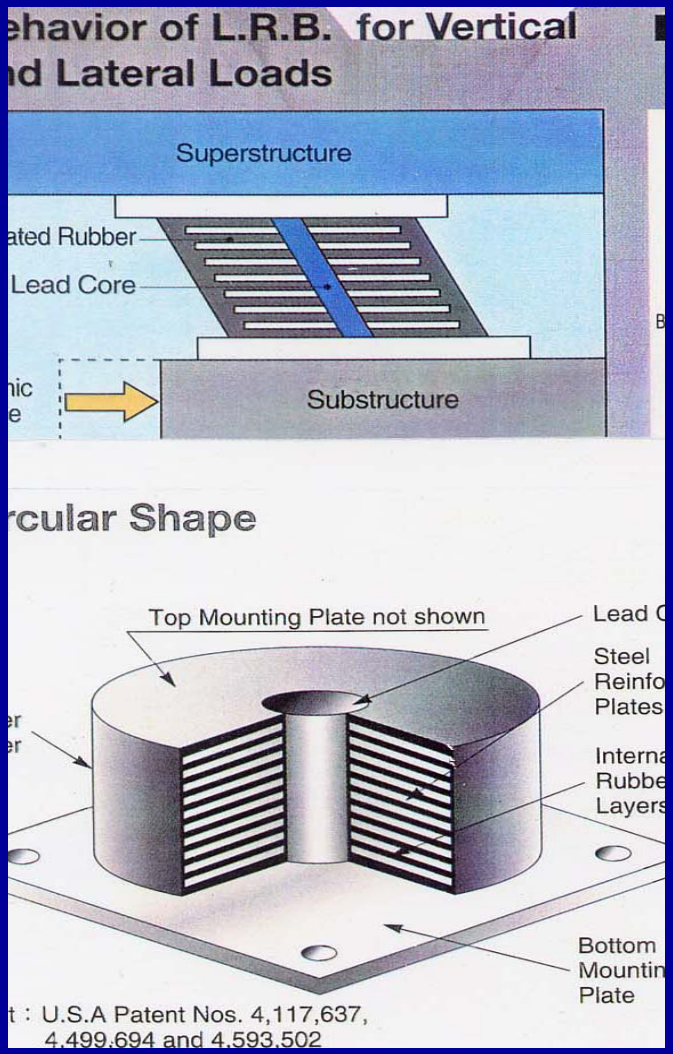
地面 400 gal

隔震房顶 110 gal

不隔震房顶 880 gal

疊层橡胶隔震支座
Laminated Rubber Bearing (RB)





橡胶隔震支座良好的力学性能和耐久性能

夹层橡胶支座性能和检验要求

(1) 竖向承载力—极限 ≥ 90 MPa, 设计10-15 MPa

(2) 竖向抗拉能力 — 拉断试验 Pt≥ 2 Mpa, 设计 1MPa

(3) 水平剪压刚度, 阻尼比-- 剪压试验 50, 100, 250 %

(4) 水平变位能力 —大水平变位试验 350 %

(5) 相关性能试验：对水平刚度, 阻尼比的影响

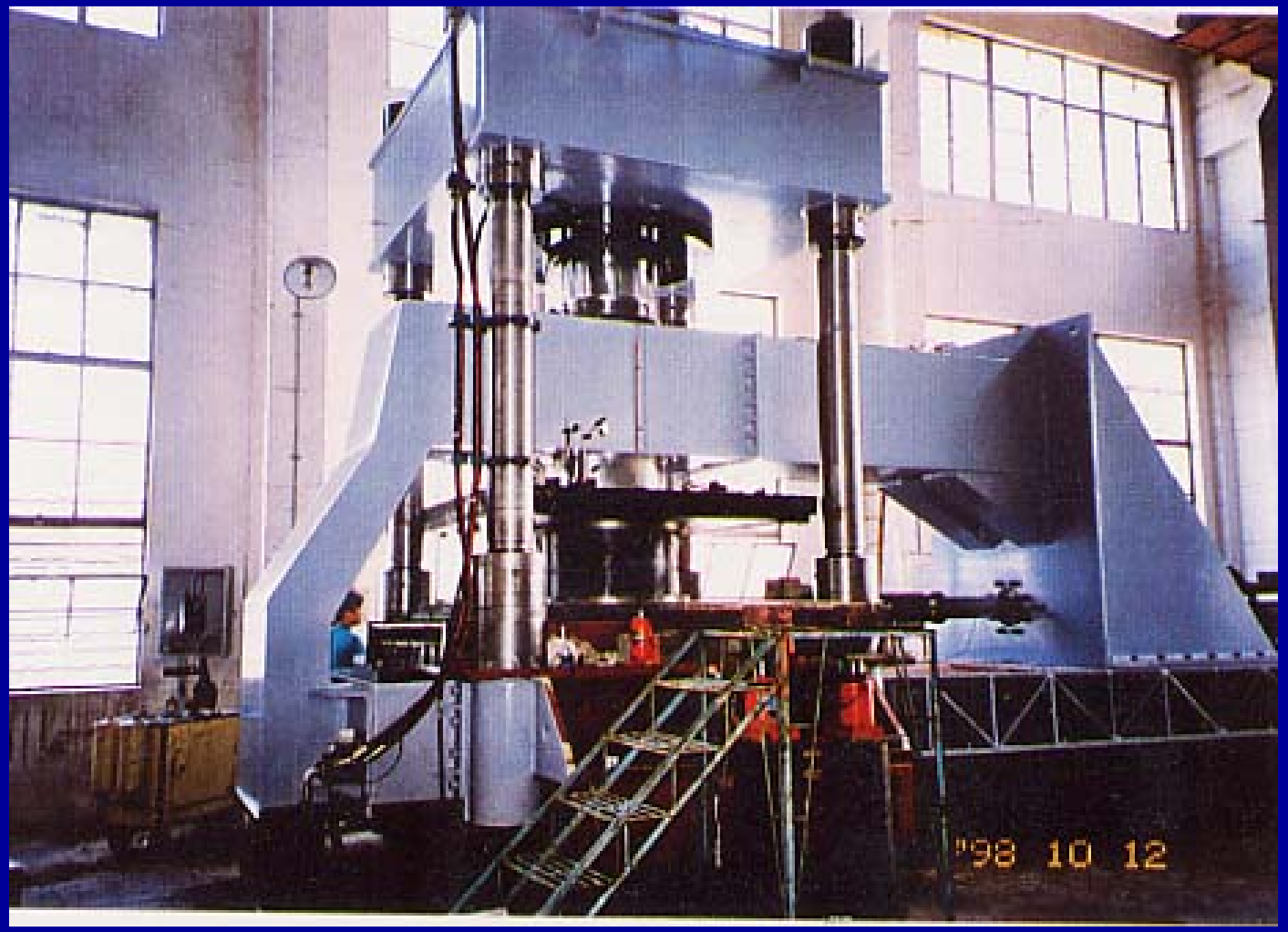
竖向承载力, 水平变形大小, 水平加荷频率, 温度变化

(6) 耐久性试验 — 长期试验（要求 ≥ 60年）

1. 耐疲劳试验:150次
2. 耐徐变试验（185h）
3. 耐老化（185h）

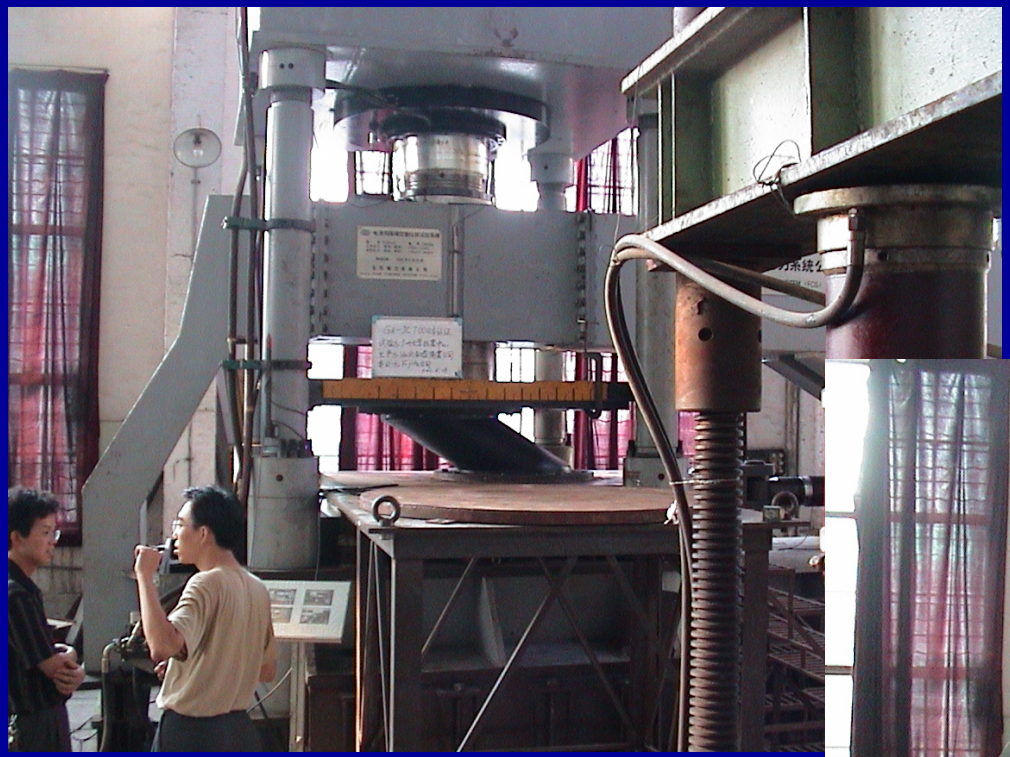
Seismic Isolation-Rubber bearings tests

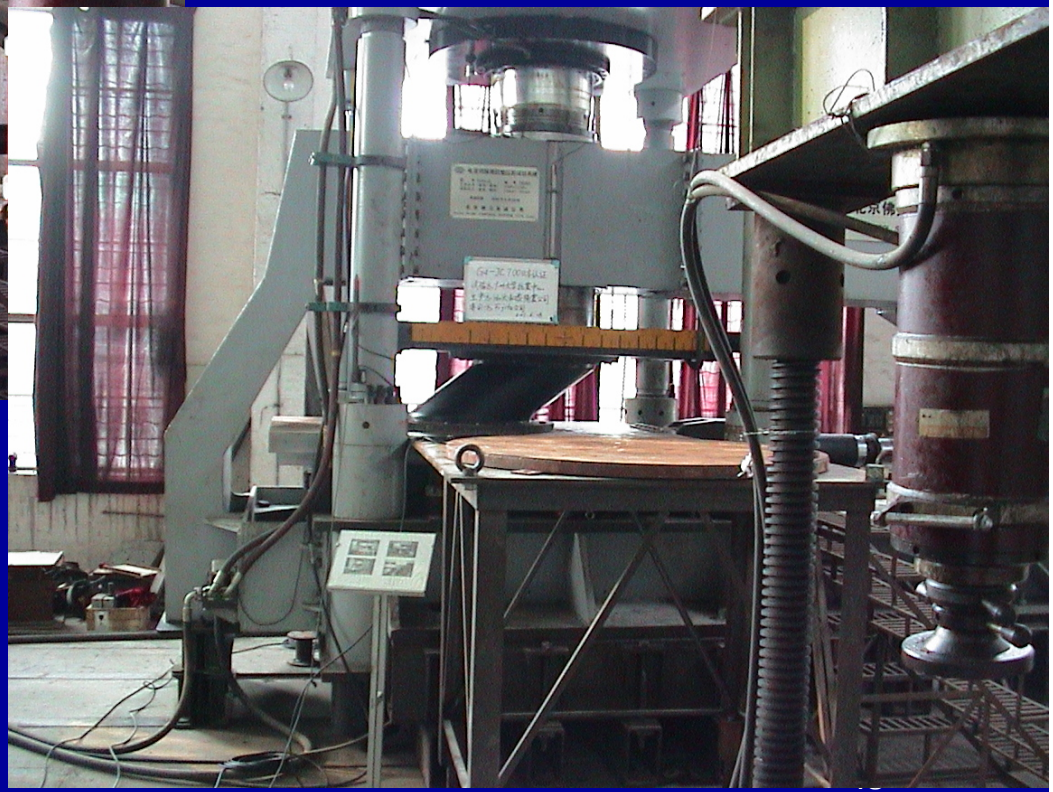
广州大学 工程抗震研究中心



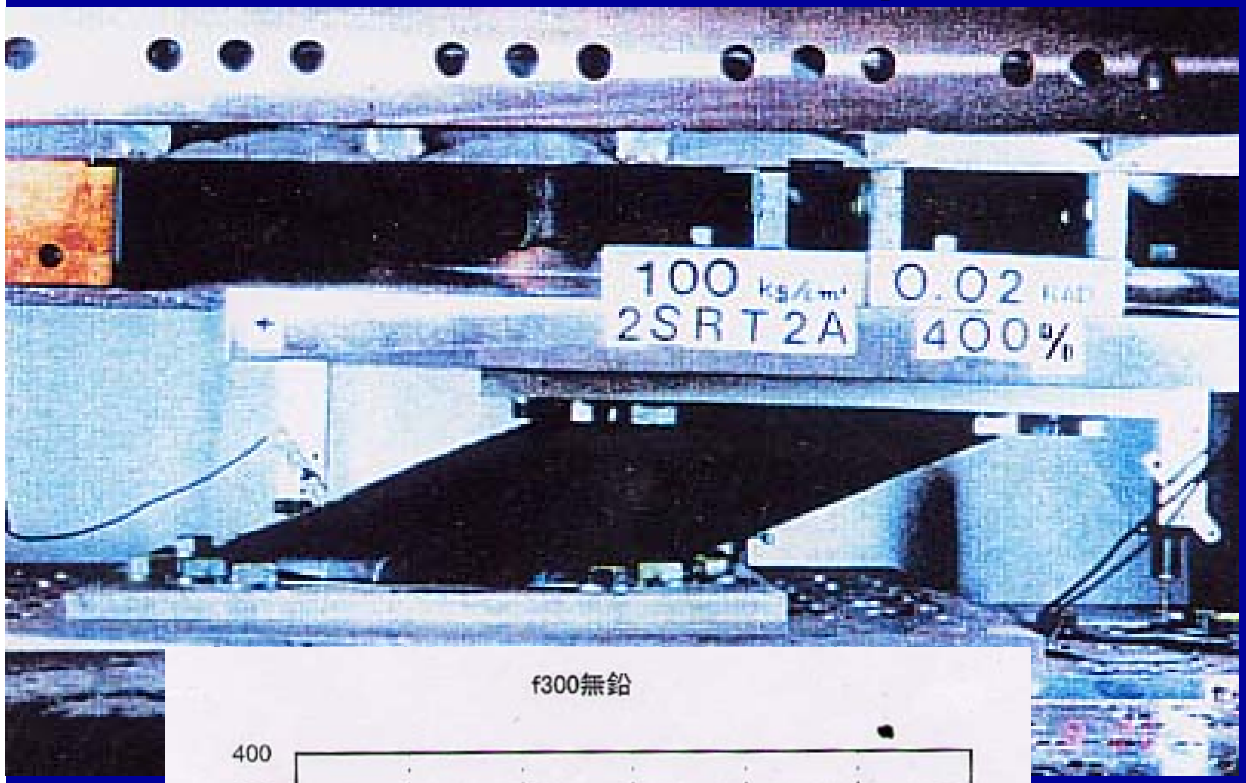
Seismic Isolation-Rubber bearings tests

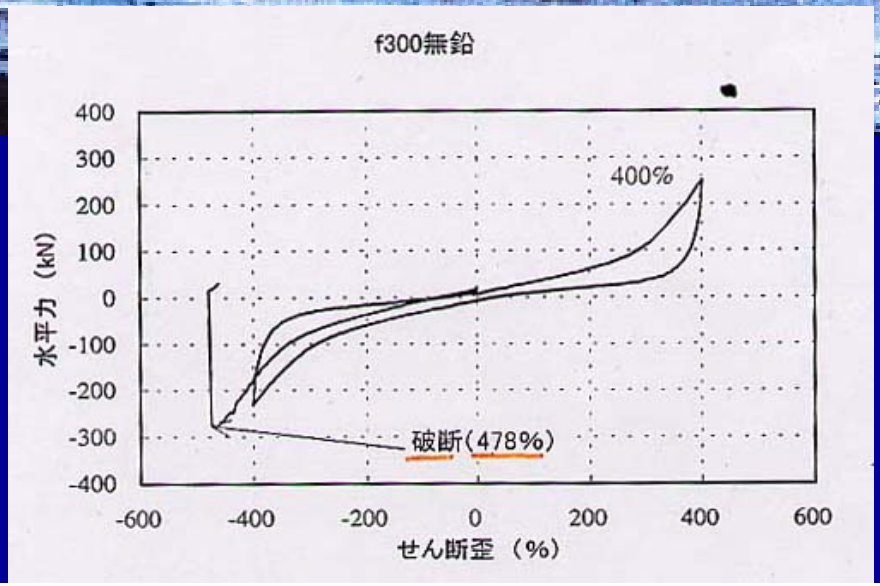
广州大学





(M)0001 Rubber bearings tests
Horizontal displacement capacity tests





徐变试验 广州大学

加速：（185h）

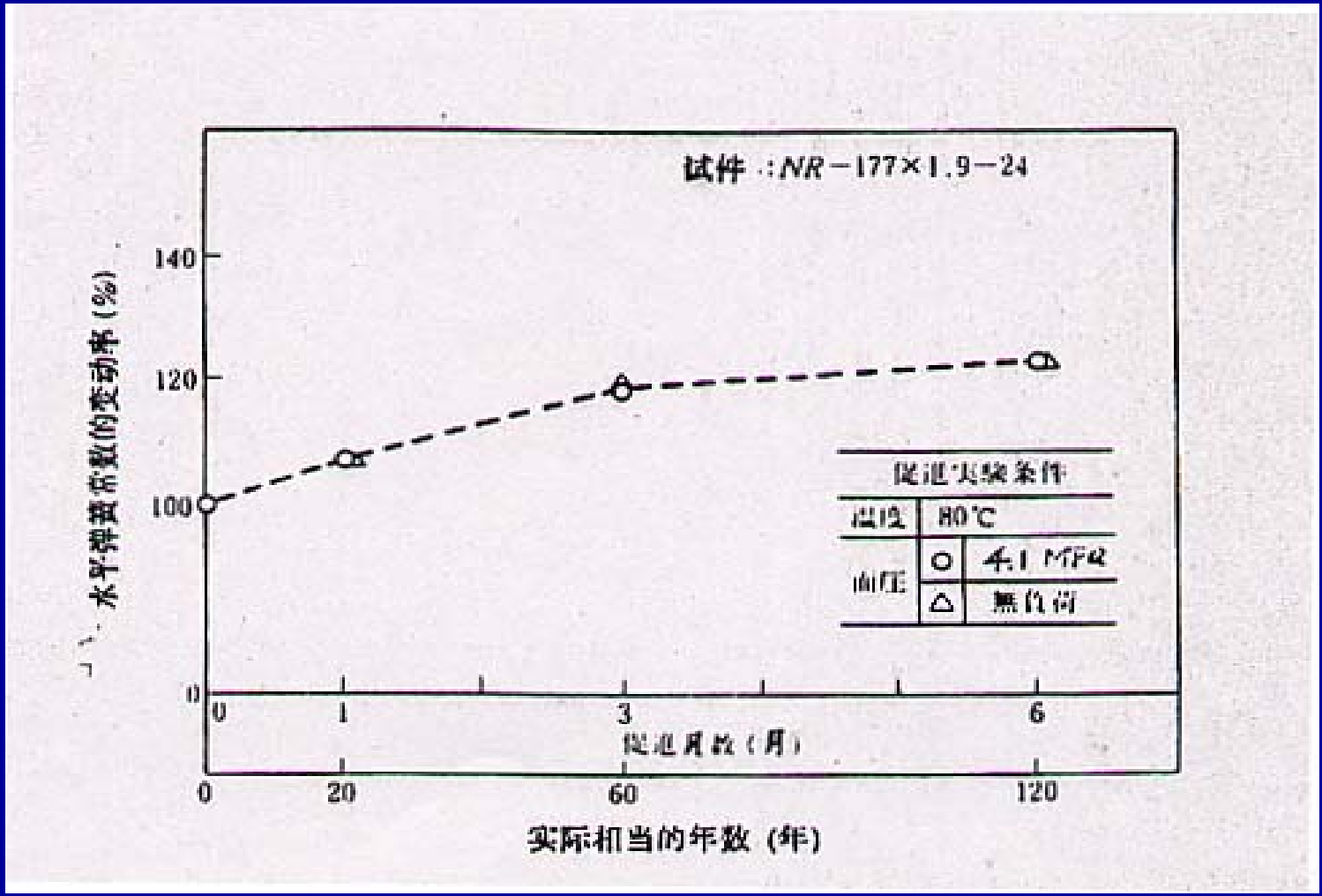
足尺 50年：
2001-2051

Seismic Isolation-Rubber bearings tests

老化 试验 Ozone aging tests 广州大学

Seismic Isolation-Rubber bearings tests

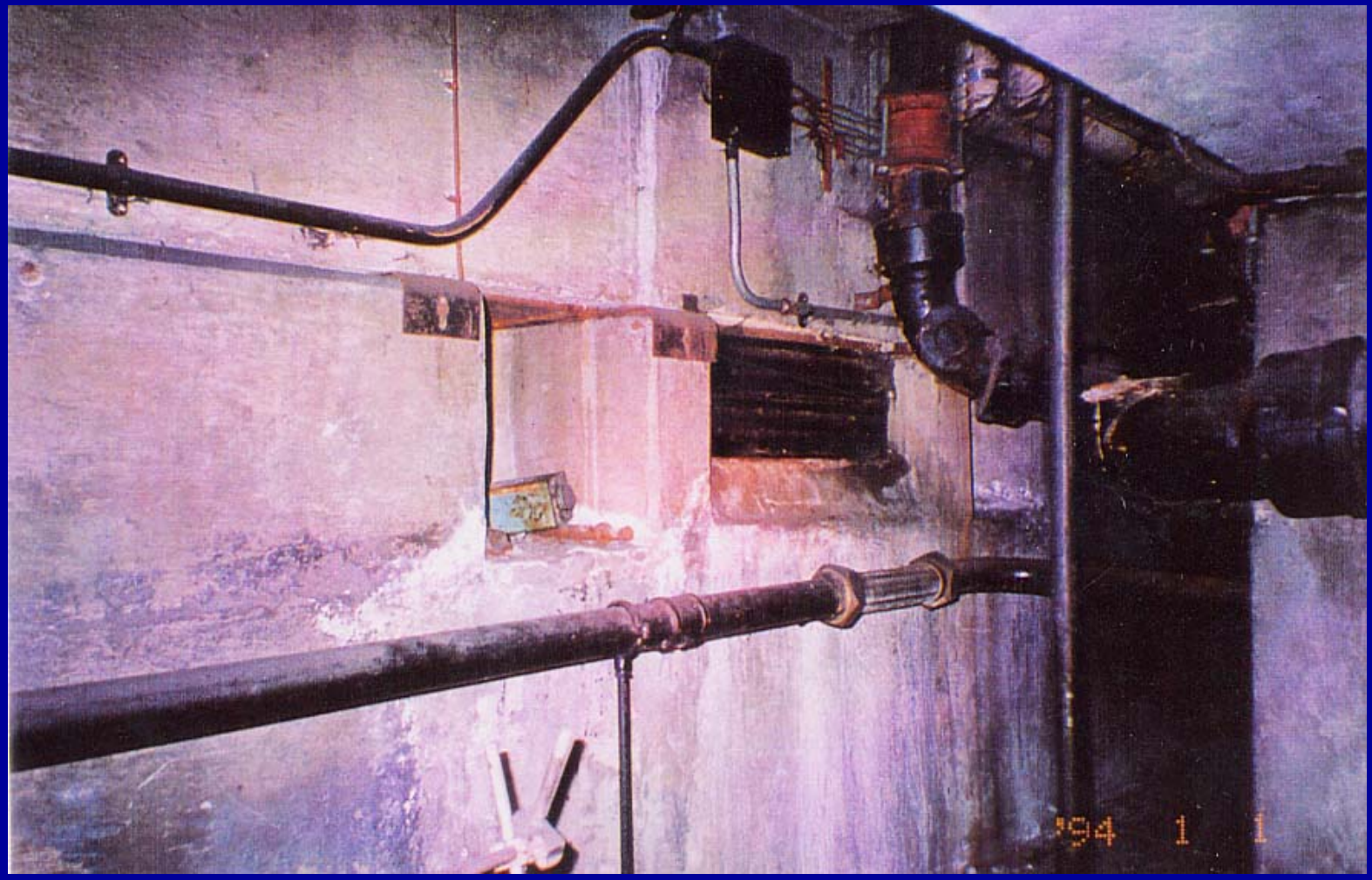
Durability testing results



耐久性调查（1995）-Rubber bearings tests

Durability investigation for rubber bearings (1)

伦敦,地下室隔震橡胶支座(1934)



Seismic Isolation-Rubber bearings tests

Durability investigation for rubber bearings -
1995 London (1934)

Seismic Isolation-Rubber bearings tests

Durability investigation for rubber bearings

Site Investigation of Durability of real Rubber Bearing:

Countries	Structures	Working life (yr.)	Thickness of ozone
China	Bridge	1956-1996 (40yr.)	
UK	Bridge (Pelham)	1954-1995 (41yr.)	3mm
英国UK	Building (London)	1934-1995 (62yr.)	3mm 3.5mm
澳洲 Australia	Bridge	1889-1995 (106yr.)	4- 5mm

Conclusion : Real working life > 100 yr.

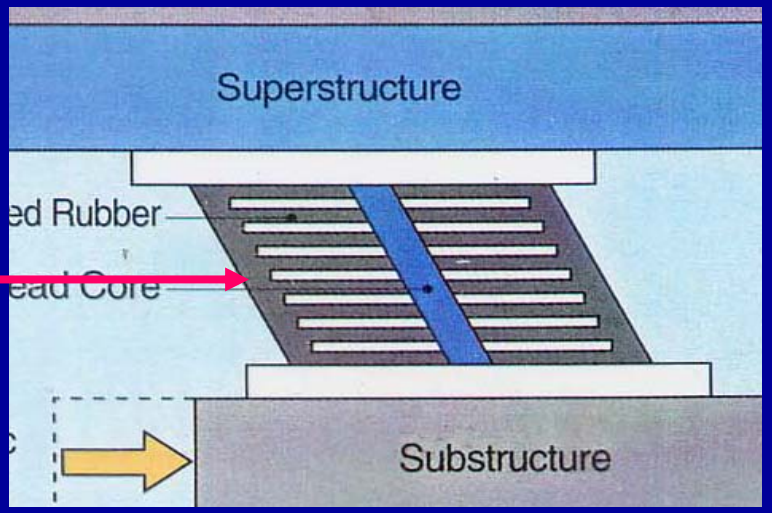
Safety measure: Add resistant ozone material to rubber

Set a cover layer 10mm around bearing

抗老化 寿命 超过100年 长于混凝土

措施：胶料加抗老化剂
提高30%，

支座外包保护层10mm



隔震设计应用
真实地震考验

世界中, 美, 日 三国 隔震结构工程应用

应用: 中国 已建近 700 幢

美国 已建近 100 幢

日本 已建近 2500 幢

中国应用数量：1991年～2007

已建 700 幢

（广东, 西昌，新疆，云南，山西.....）

我国 隔震技术的 应用及地震考验

为人民建造确保地震时安全的住宅

(1) 中国隔震建筑分布：

已应用在我国广东，福建，山西，陕西，云南，四川，宁夏，内蒙古，新疆，河北，河南，江苏，北京，上海，天津，台湾等16个省市自治区

(2) 中国隔震建筑数量：

在我国设计和建成隔震房屋 700多幢

(3) 范围:住宅, 办公大楼, 教学楼, 医院, 指挥中心.

邮电通信楼, 博物馆, 体育馆 ....

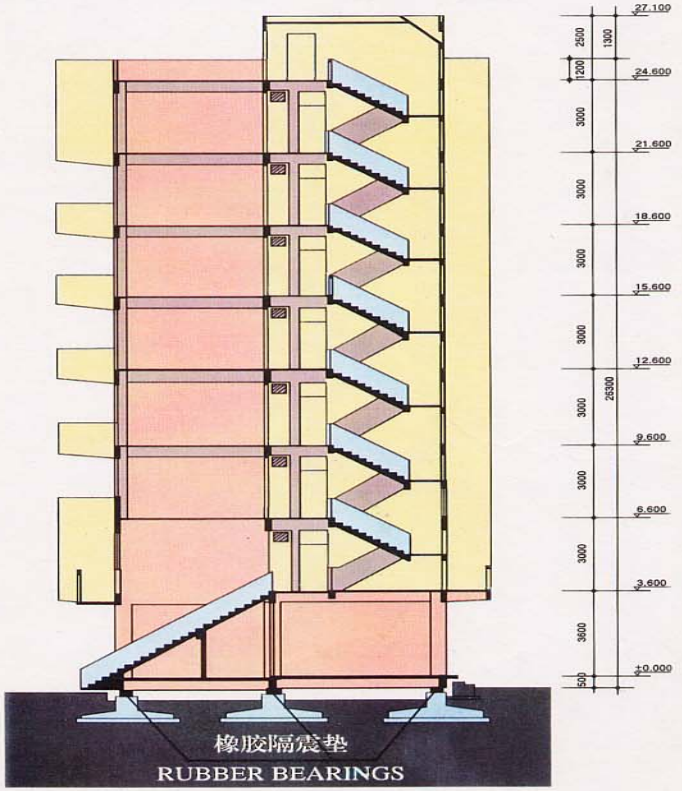
民用住宅50 %, 重要建筑40 %, 其它10 %

我国第一棟橡胶支座隔震房屋（8层住宅）- 广东汕头
联合国 UNIDO 项目 1989-1993

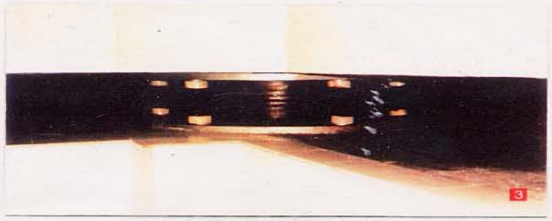
工程应用实例

中国汕头夹层橡胶隔震垫已成功应用于全国各地的房屋建筑之中。先后应用于汕头市、广州市、澄海市、西昌市、大理市等近二十幢房屋。其中汕头博物馆是目前国内采用隔震技术进行设计的最高和最大公共建筑，共十二层，42米高，建筑面积18000m²。此外，隔震垫还用于地下铁道结构的隔震和工业设备的减振、减噪等，并应用于其他国家和地区的建筑隔震工程项目中。

汕头市陵海大路住宅楼
Eight stories house building with base isolation in Shantou, China



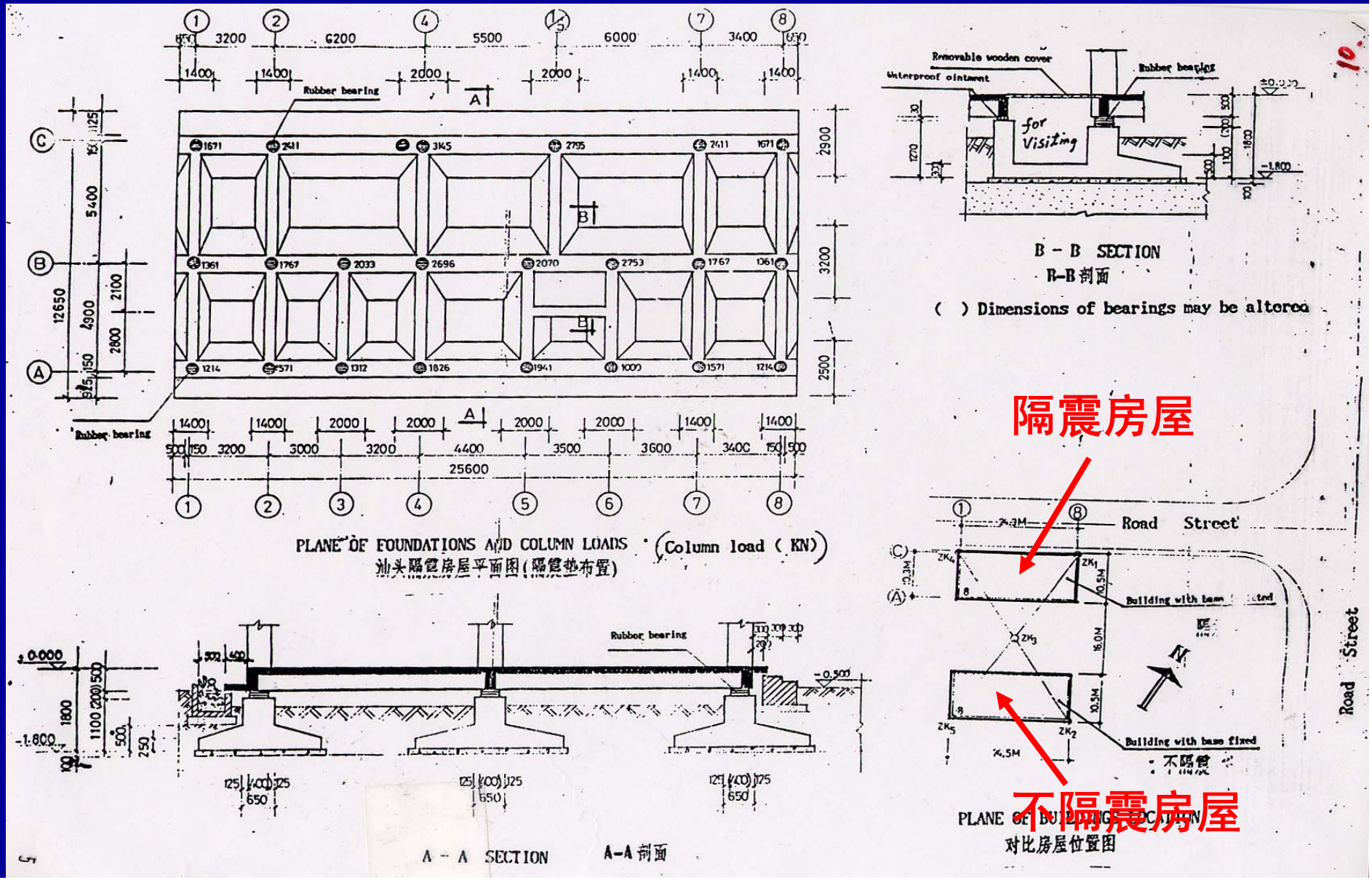
中国首幢橡胶隔震房屋
The first multi-stories house building with Rubber Bearings



隔震垫节点大样
Detail of base isolation with Rubber Bearings made in Vibro-Tech

Seismic Isolation-Application in China

平面布置图Houses in Shantou City (2)



隔震结构 工程应用 及 地震考验

Seismic Isolation- in Shantou City--Earthquake experience

中国第一栋：1993年 汕头8层隔震房屋

（联合国UNIDO国际项目）

中国地震考验：1994.9.16 台湾海峡地震

（M7.3）

汕头传统房屋：晃动激烈

人站不稳

青少年跳窗逃（死伤126人）

水桶溅水1/3

汕头隔震房屋：人无震感

云南大理--隔震结构工程应用和地震考验（1995. 10. 24）

关于武定地震对大理橡胶隔震建筑影响的调查报告

1995年10月24日（农历九月初一，霜降，早上10点多发生日全食），早上6:50分武定发生6.5级地震，距大理水平距离大约200公里。地震发生时，许多人从睡梦中惊醒，都明显感到较强的晃动，听到类似汽车发动的响声，听到门窗响动声，听到桌上的花瓶、玻璃杯等的跳动声，悬挂物摇摆很大，地震烈度约5度强。

地震后我们对橡胶隔震建筑大理州交通指挥中心大楼进行调查，访问了住在二层、五层、七层的装修工人约70人，多数人没有感觉，只有约20%的人感到有轻微摇动，直到听到其他建筑物内的人讲，才知道发生了地震，隔震建筑无任何破坏。

从以上调查可以看出，橡胶隔震建筑有明显的减震效果。

调查人：刘榆生

纳弃成

单　位：大理市设计院

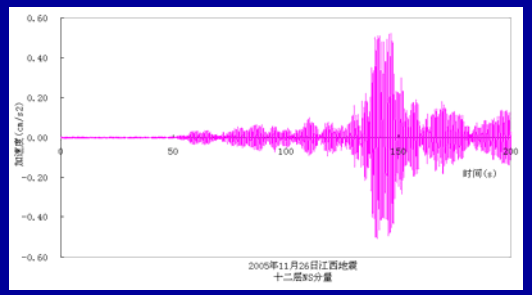
1995年10月24日

福建省地震局
隔震楼 2005

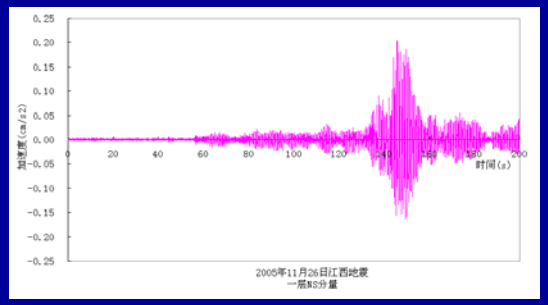
地下1层
地上11层
混凝土框剪结构

福建省地震局隔震楼

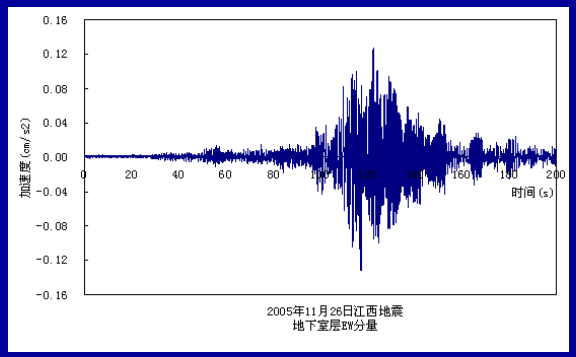
2005.11.26 江西九江地震(5.7级) 地震考验



	隔震	不隔震	隔震/不隔震
第12 层	0.14	0.59	1 / 4.2



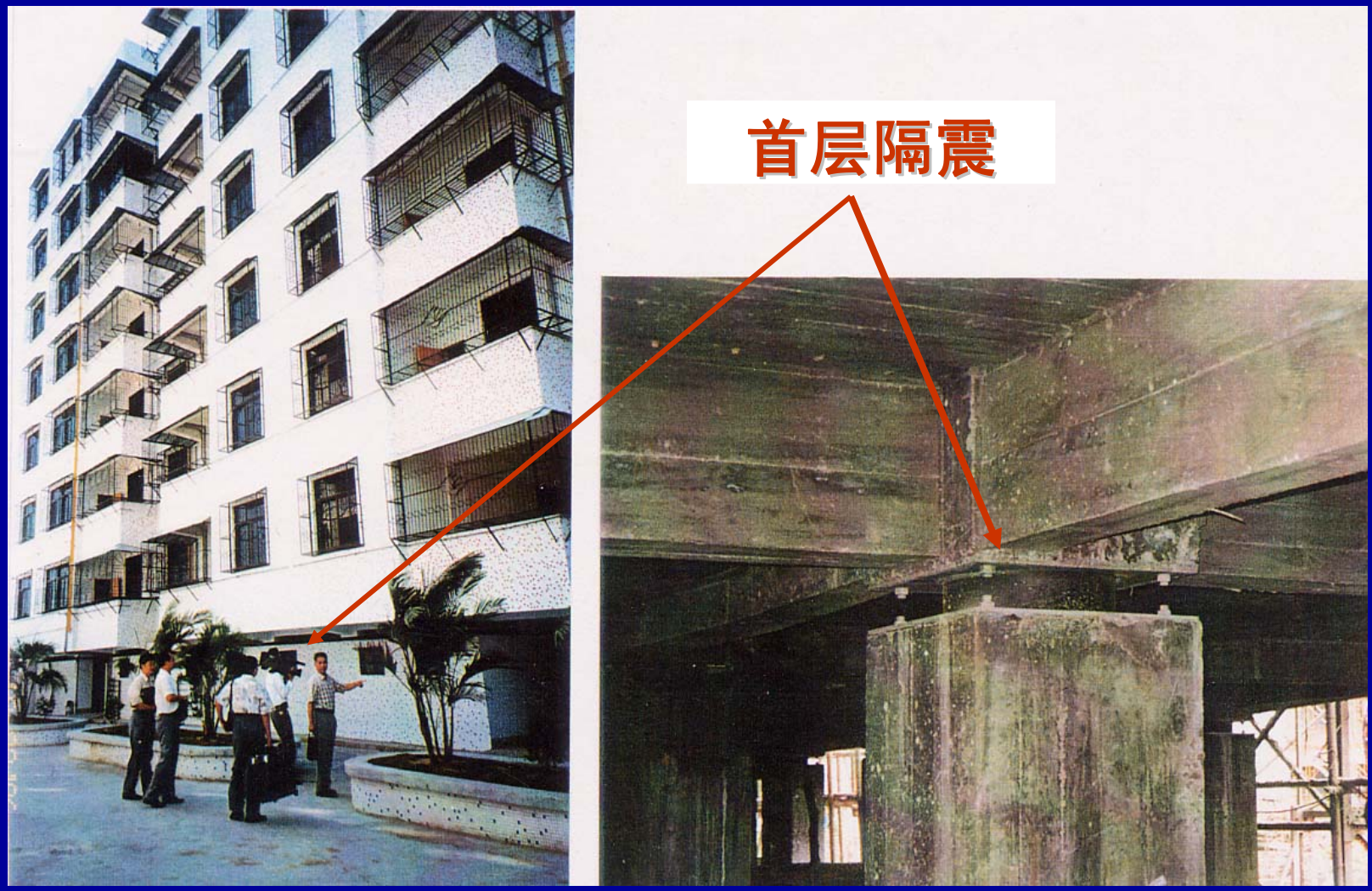
第 1 层	0.10	0.12	



地面	0.12	0.12	

首层隔震 广东澄海 政府干部住宅楼（7层）

Houses buildings in southern China



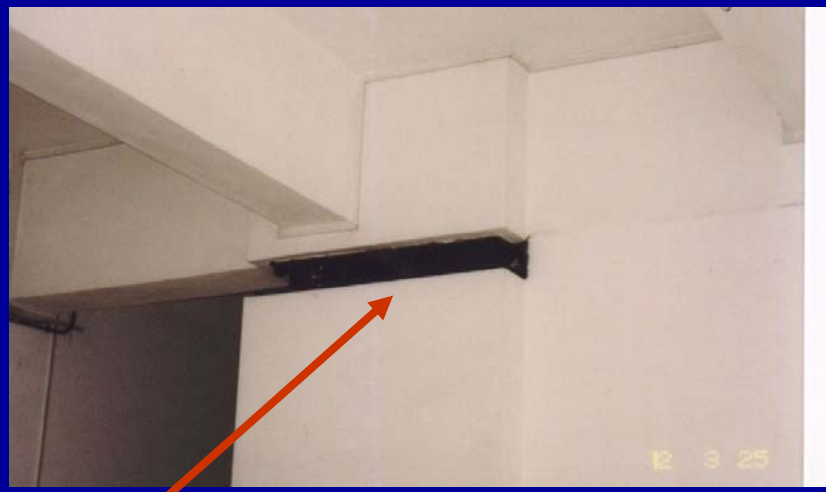
四川 西昌 隔震住宅楼（8栋）1995

Houses in Xichan City

隔震支座

基底隔震

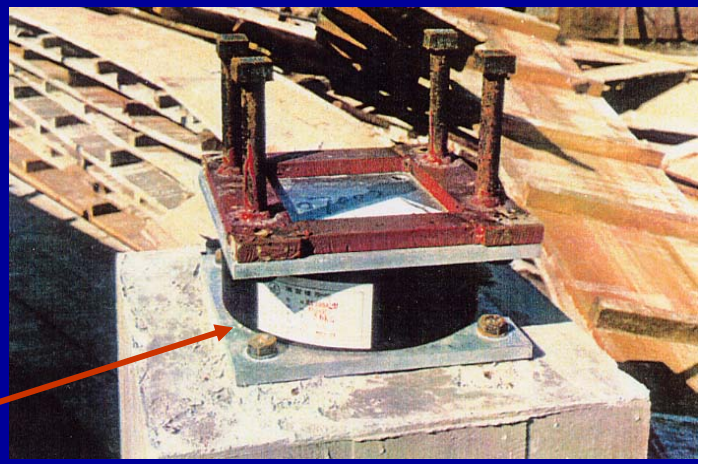
首层隔震　广州市地震监测指挥中心 2000年



首层隔震

汕头博物馆 1996年

Museum in Shantou City, southern China (1)



首层隔震

太原市 图书挡案馆 隔震楼(6层) 1998

基底隔震

隔震支座

太原 综合楼- 19层Application in China

High rise (19 story) building in Taiyuan City,northern China

新疆 乌鲁木齐 石化厂区 隔震住宅楼群
（38栋，13万m^2）2000年，当年世界面积最大隔震住宅群

(基底隔震)

新疆 乌鲁木齐 第八钢厂区 隔震住宅楼群
（36栋，12万m^2 ）2001年，当年世界面积最大隔震住宅群

（基底隔震）

Isolated buildings -- the largest area in the world

隔震层 (隔震支座)

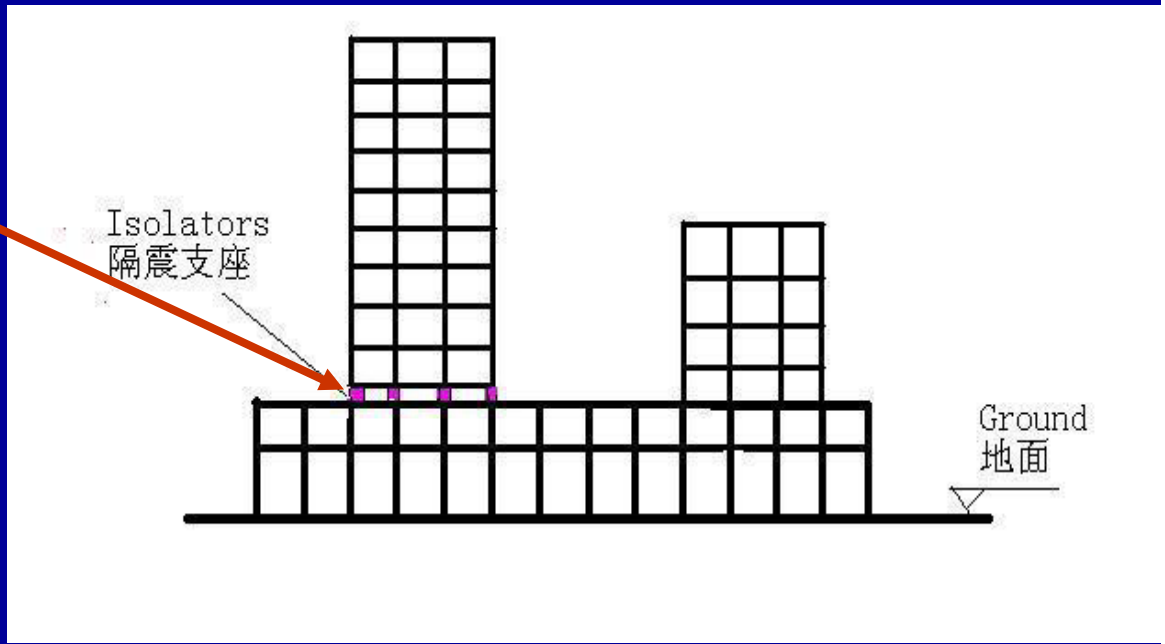
北京地铁 地面枢纽站 大面积平台上 隔震住宅楼(建设中)

- RC 大平台（2000米×1500米）上
  建造 28 幢 9层的 隔震住宅楼

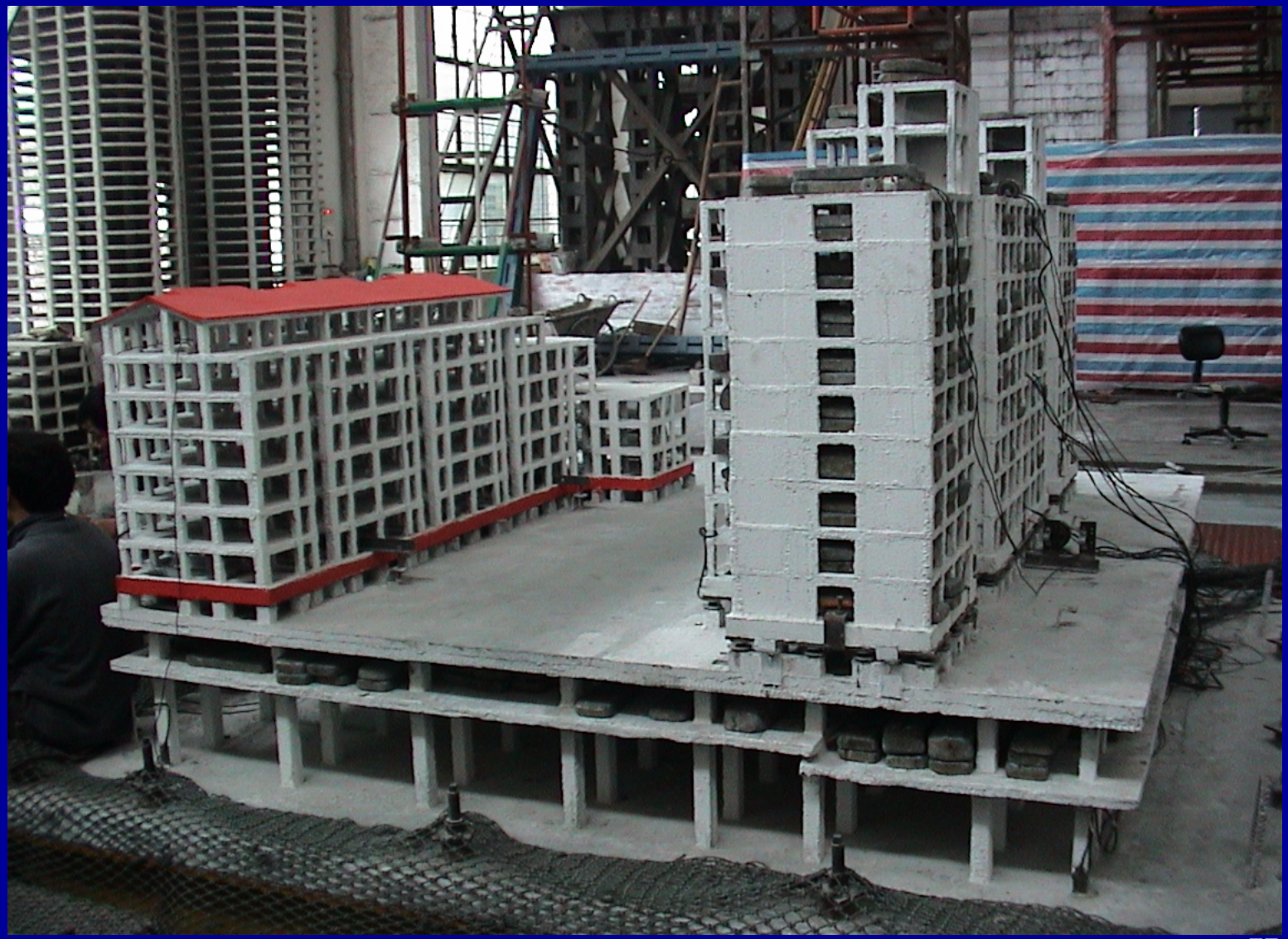
- 隔震建筑面积 24万 平方米
  目前 世界面积最大 隔震建筑群

层间隔震 – Stories Isolation

隔震层 (隔震支座)



北京地铁 9层 隔震房屋



(M) 17p04 BJ ISO 01
Stories-isolation Shaking table tests ）

隔震

El Centro (N-S)

(Transverse) X

Ground Motion

地面 **Ag= 0.366 g**

Isolation

Structural Acc.

结构 As= 0.122 g

Stories-isolation

隔震

房屋完好无损

El Centro wave

Tianjing wave

Local Site wave

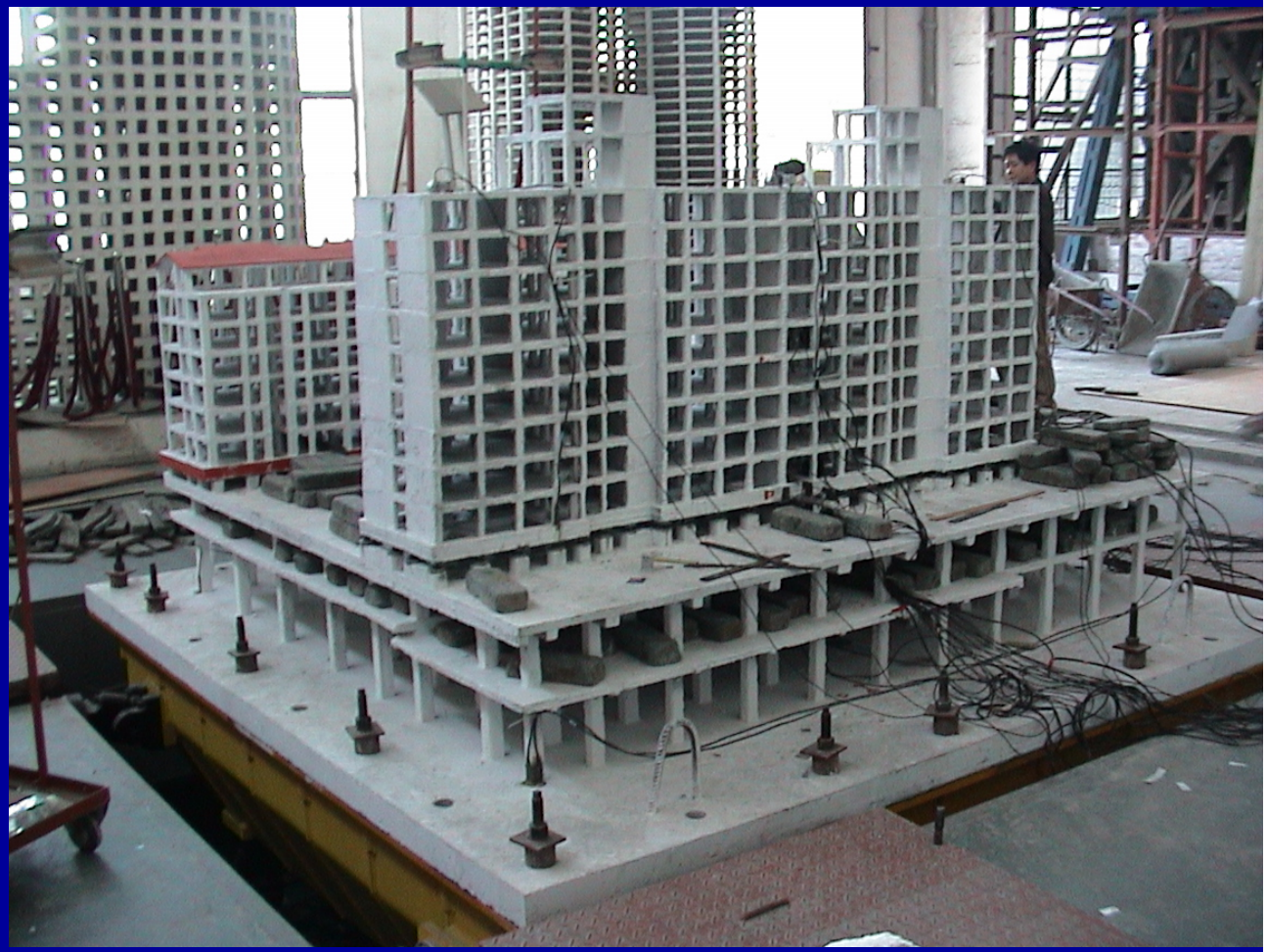
Ground Motion

地震 Ag= 0.60 g

Isolation

Structural Acc.

结构As= 0.11～0.16 g



(M) 17p04 BJ ISO 07

Stories no- isolation Shaking table tests）

不隔震

No- Isolation (Fixed)

Damage, Collapse

El Centro (N-S)

(Transverse)

Ground Motion

地震 Ag= 0.366 g

Structural Acc.

结构 As= 0.834 g

Comparison:

隔震/不隔震 = 1/4

Stories no-isolation (Severe damage,collapse)

北京地铁 地面枢纽站 隔震住宅楼 技术经济效益

(1) 房屋抗震安全度提高4倍

(2) 平台的地震反应降为 2/3

(3) 住宅面积增加近 10万平方米
（房屋从 6层 增加到 9层）

(4) 直接增创产值 6 亿元(6000元/平方米)
（未计 间接效益）

广东省科学中心
振动台隔震试验

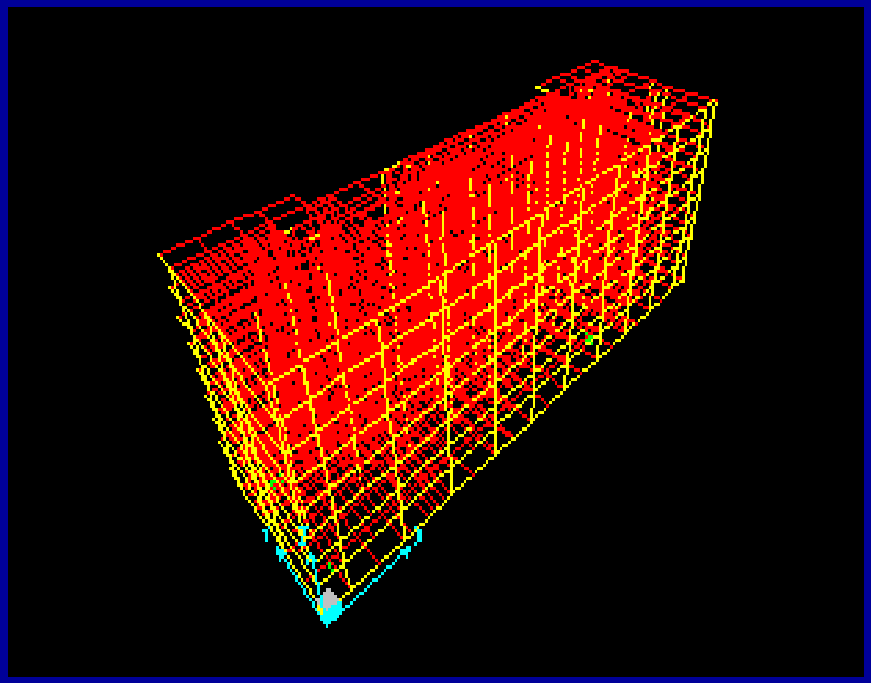
复合隔震体系的工程应用(广州大学城，办公楼)

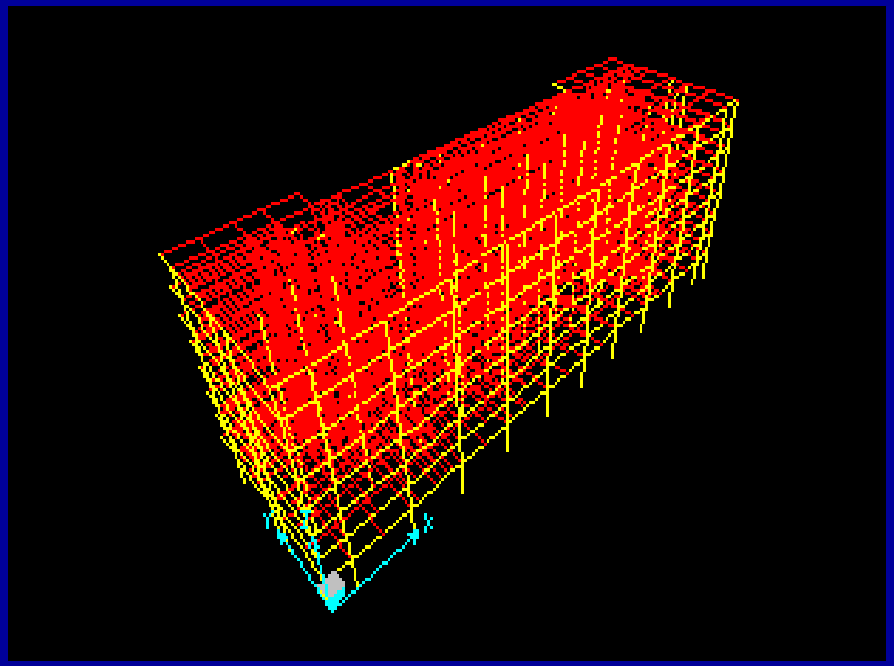
北京中央 7 个部委联合办公大楼 2004
（隔震大楼）

A Central Government
(7 Ministries) Office Building

- 11 stories
  （ 3 stories underground）
- reinforced concrete frames and shear walls
- Base-isolated building

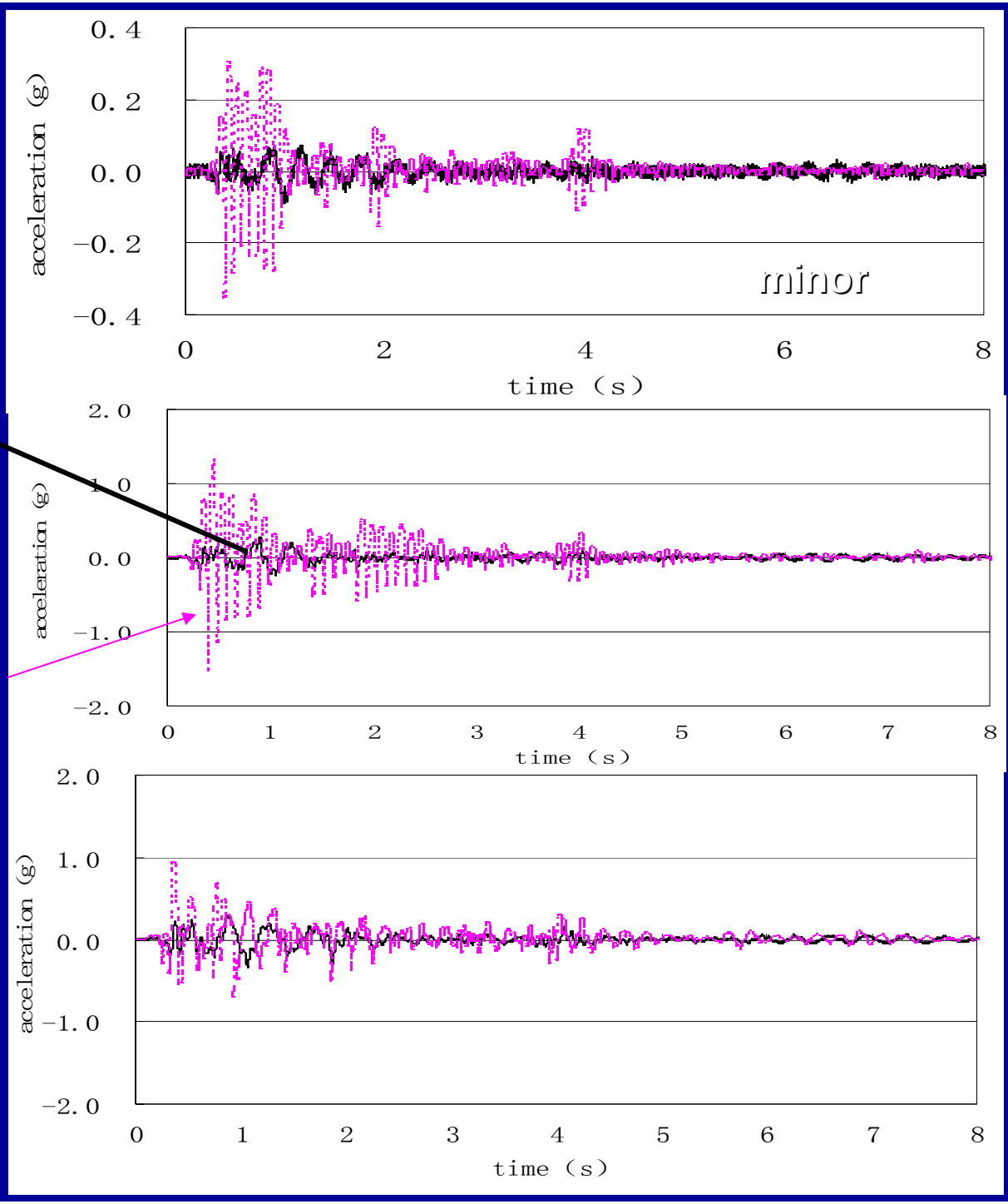
Calculation models





Isolated building

Non-Isolated building

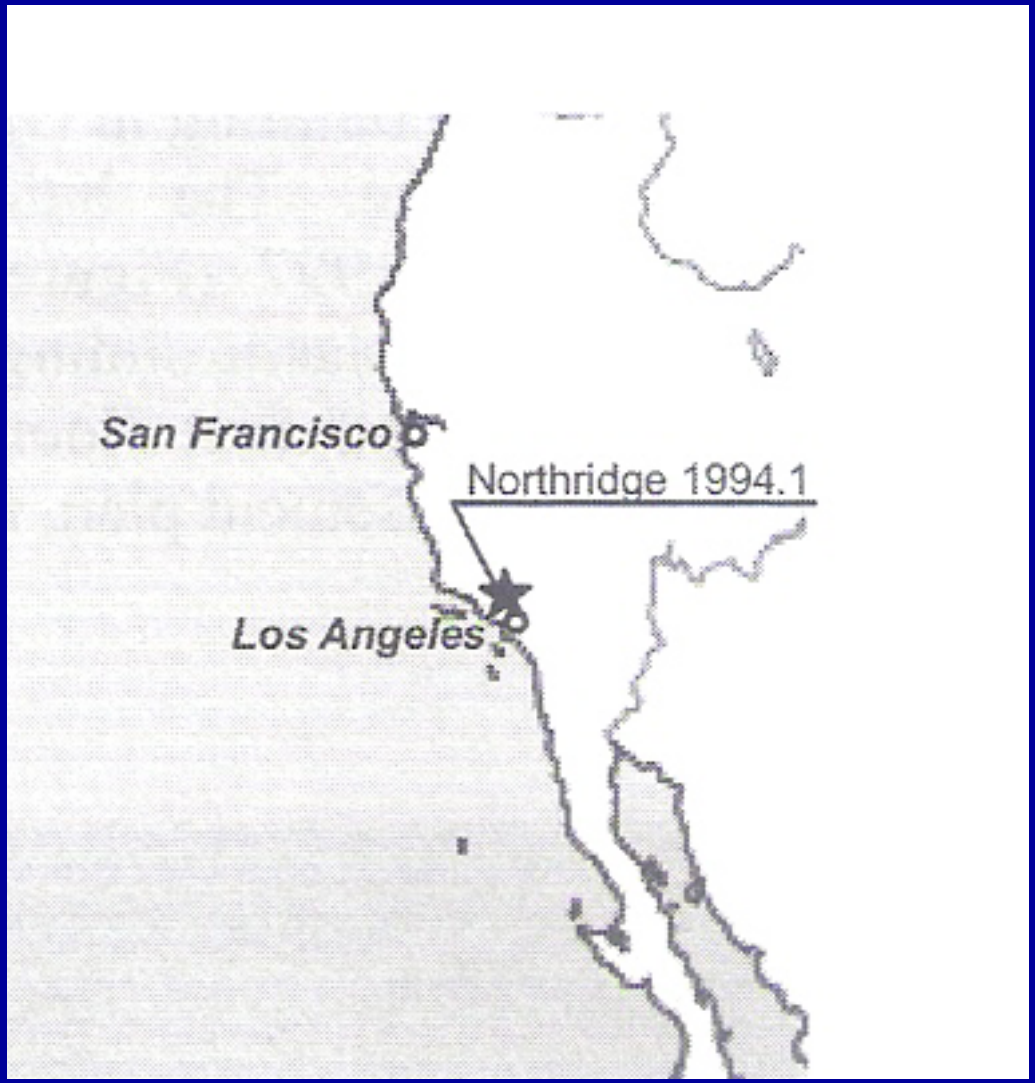

0.4
0.2
0.0
−0.2
−0.4
acceleration (g)
minor
0
2
4
6
8
time (s)
Isolated
2.0
1.0
0.0
−1.0
−2.0
acceleration (g)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
time (s)
Non-Isolated
2.0
1.0
0.0
−1.0
−2.0
acceleration (g)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
time (s)

(M)近断裂带 特大地震(Ah=1.10g,Av=0.9g)
隔震结构的安全

北京中央 8 个部委联合办公大楼 2004（隔震大楼）

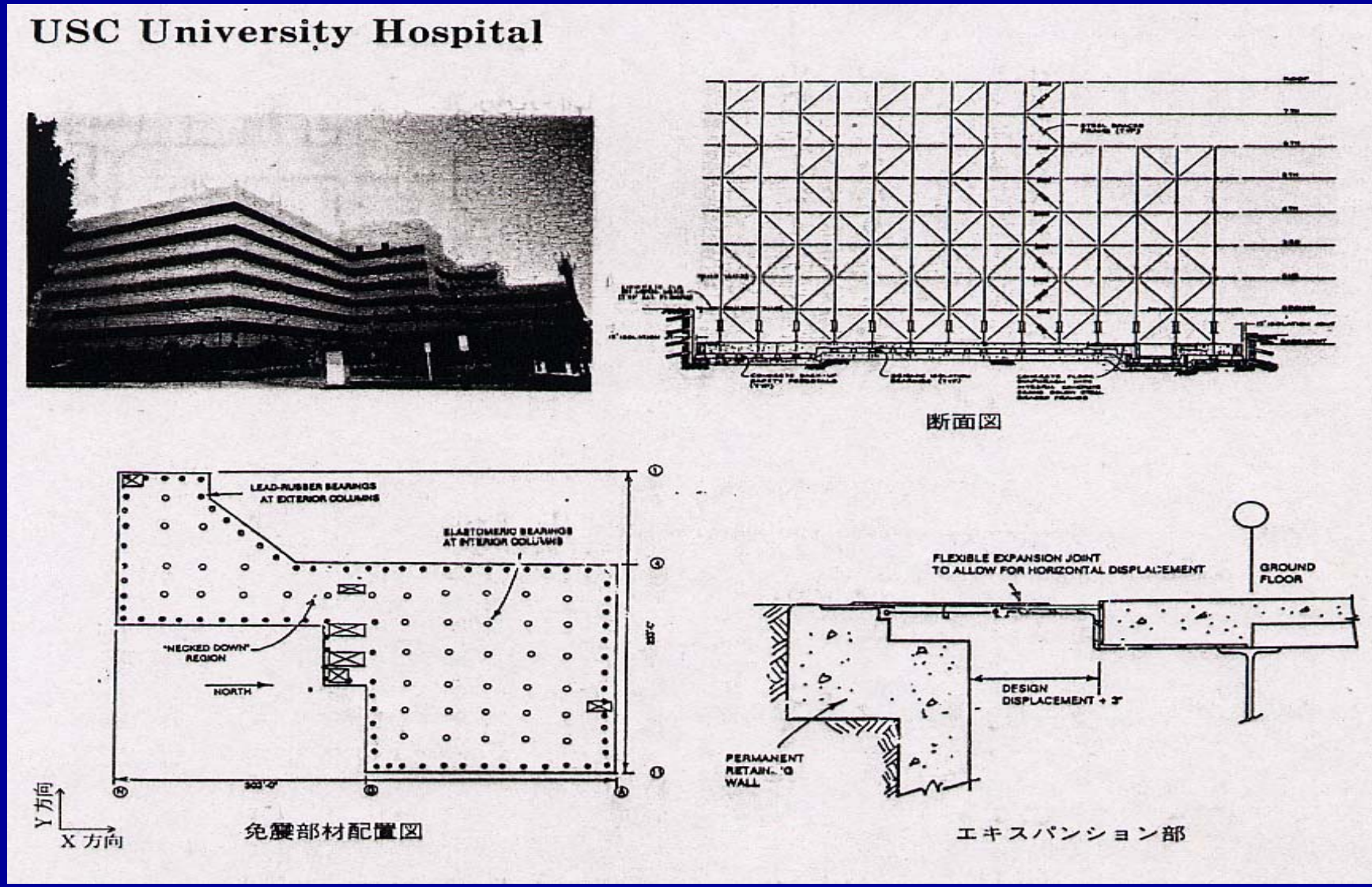
隔震技术在世界各国的应用及地震考验

USA 美国



Seismic Isolation-Application in USA (1)

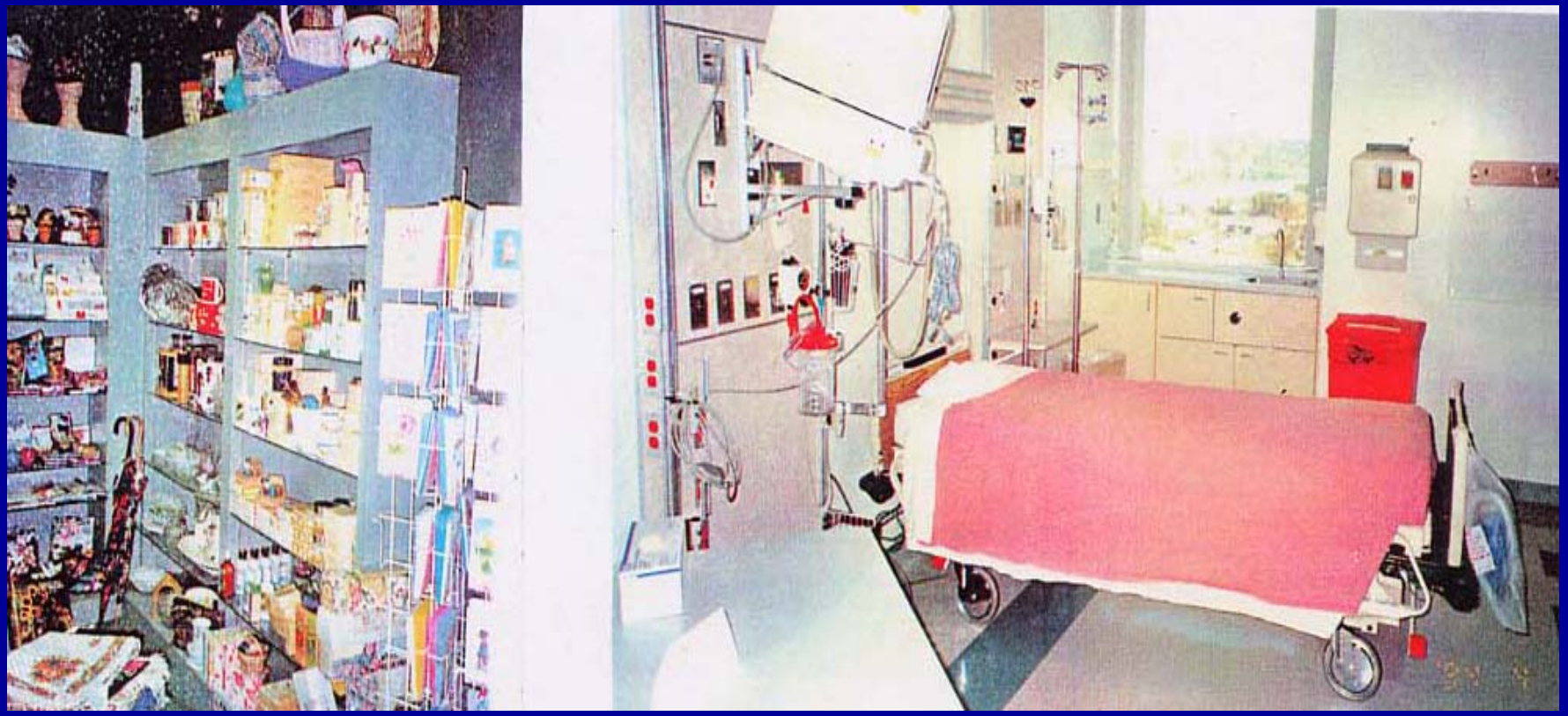
USC University Hospital – with isolation



Seismic Isolation-Application in USA (3)
USC University Hospital – with isolation
(After EQ 1994.1.17, Northridge)

Seismic Isolation-Application in USA (4)

USC University Hospital – with isolation



Olive View Hospital – without isolation

Olive View Hospital – without isolation

Olive View Hospital – without isolation

南加州 8 个医院， 1个隔震，完好无损，
7个抗震，全部瘫痪

隔震医院，成为急救中心 兼 抗灾指挥中心

USC University Hospital – with isolation

房屋加速度

隔震/不隔震

0.21g /2.31g

提高安全度 11倍

美国北岭地震 隔震房屋隔震效果记录

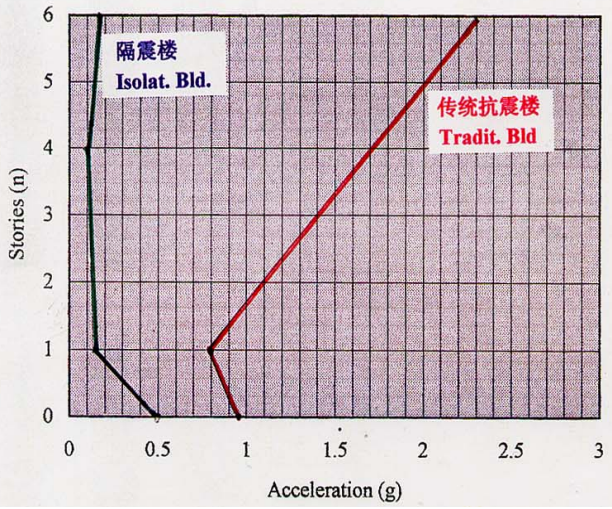
Record of Northridge EQ for Isolation Building

时间： 1994 年 1 月 17 日 Jan. 17, 1994

震级： M6.7

房屋：南加州大学医院 USC University Hospital

医院名称 Name	耐震结构体系 structure	各层最大加速度 Acceler. 隔震及传统抗震 / g 基础 base	第1层 1st	第4层 4th	第6层 6th	屋顶 roof
南加州大学医院 (七层) University Hospital	隔震 Isolation	0.49	0.13	0.10	0.15	0.21
橄榄景医院 (六层) Olive View Hospital	传统抗震 base fixed	0.91	0.82	—	—	2.31
对比 Comparing	隔震 / 传统抗震 Isolation / base fixed		0.16	—	—	0.09

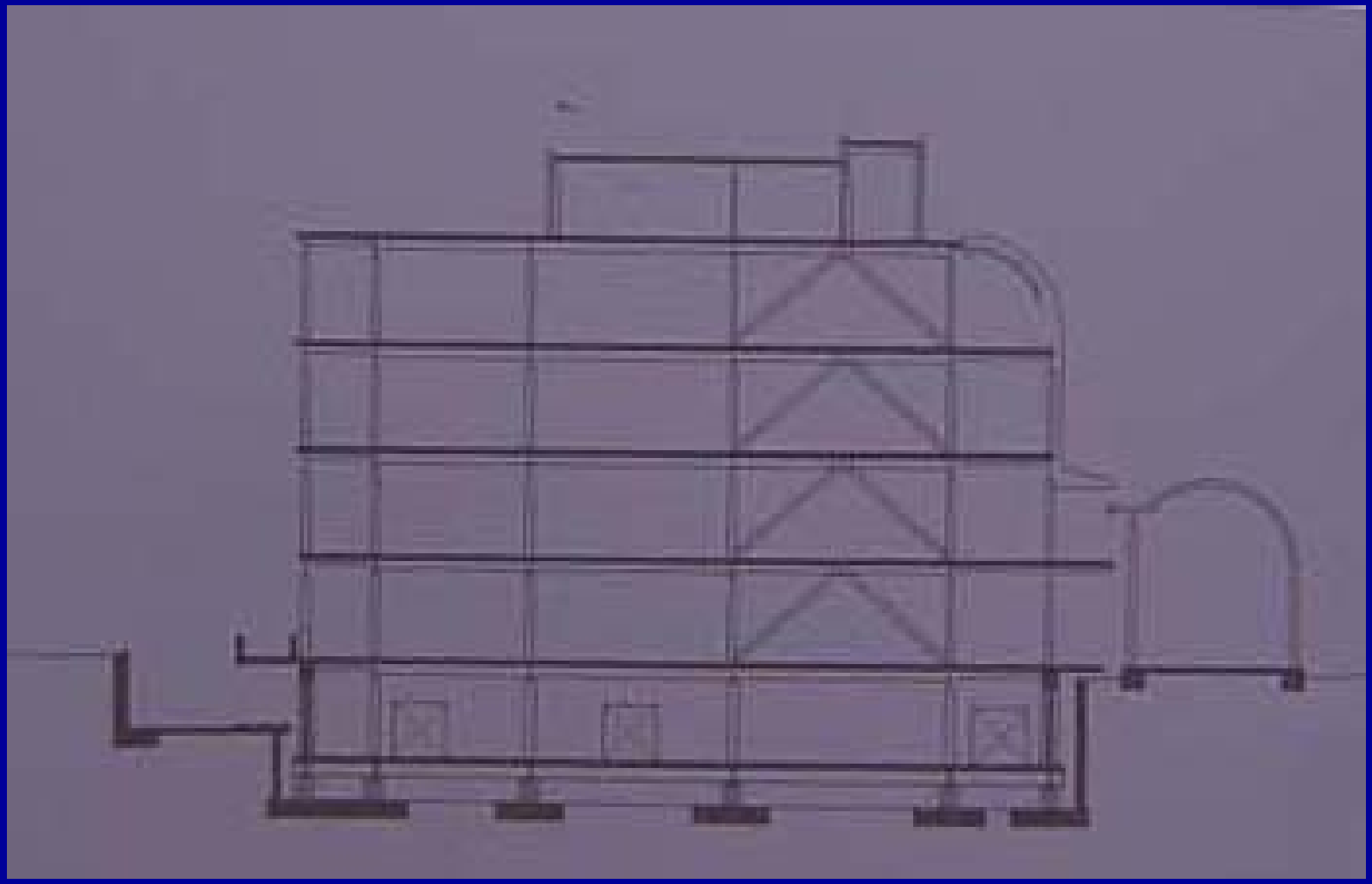


LA 灾害指挥中心 Seismic Isolation

Seismic Isolation-Application in USA

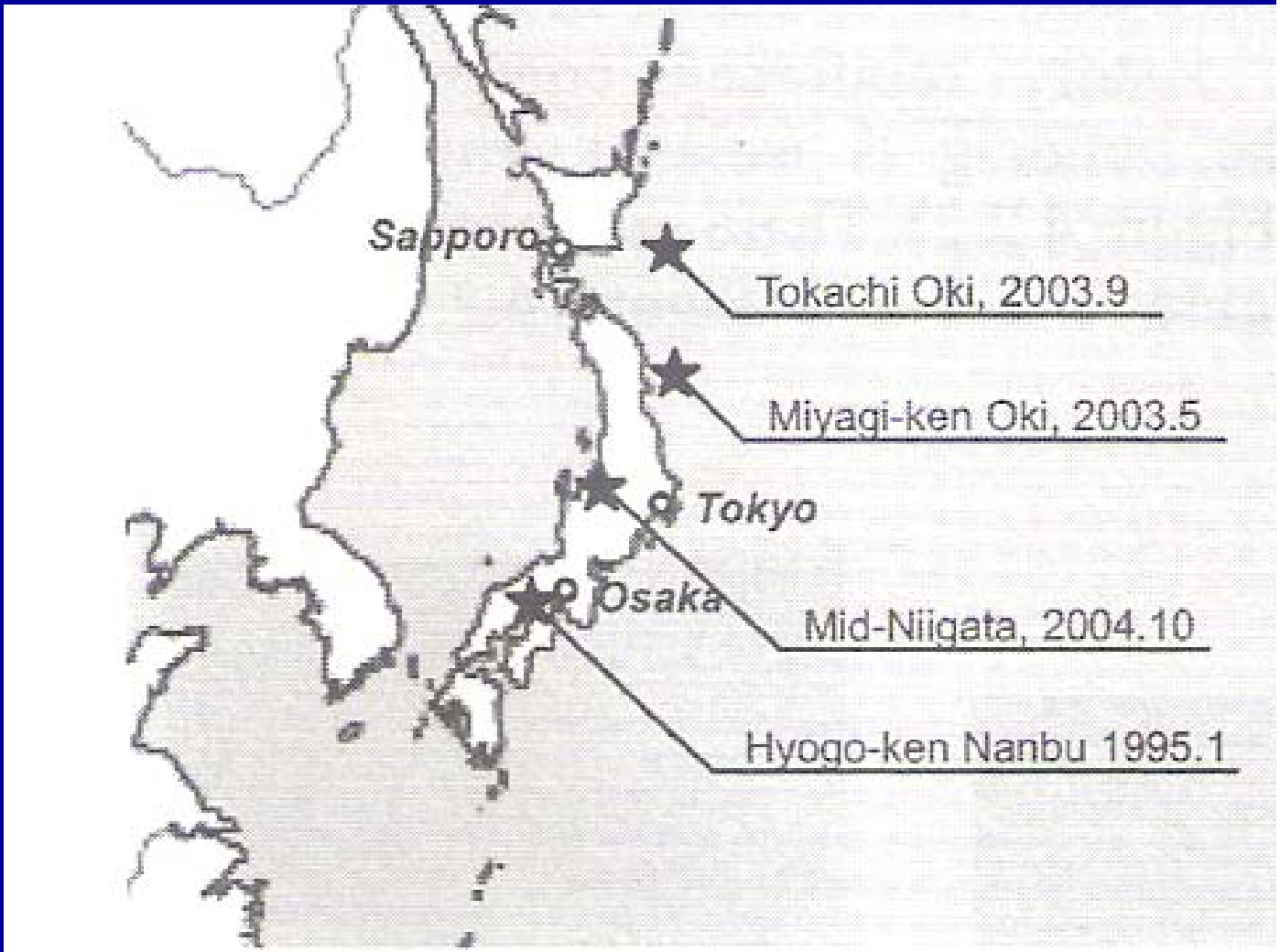
CA 中心法庭(底层监狱) Seismic Isolation

Seismic Isolation-Application in USA



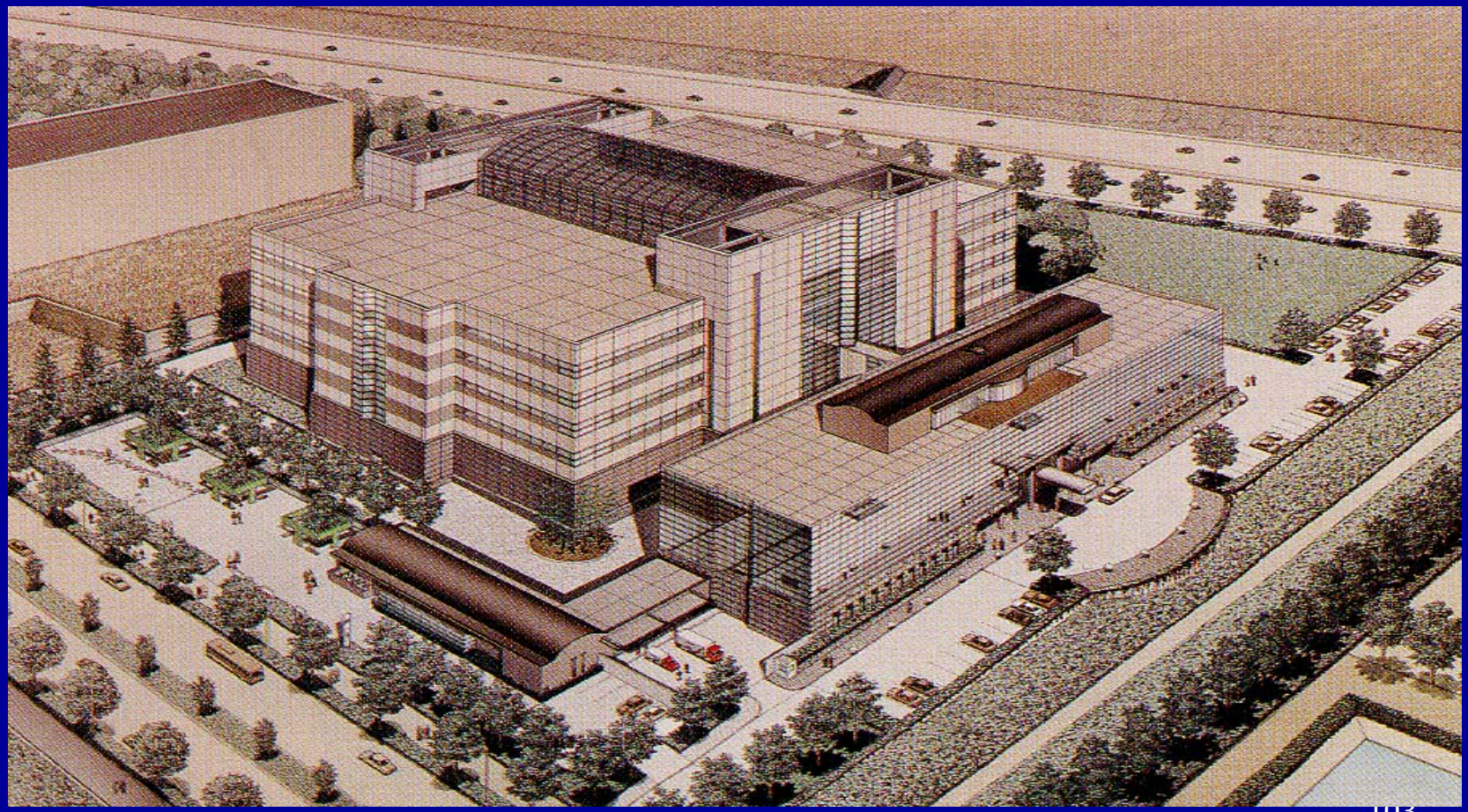
日本JAPAN
1995-2004
5000多栋

有19栋
多高层
隔房屋震
地震考验
记录

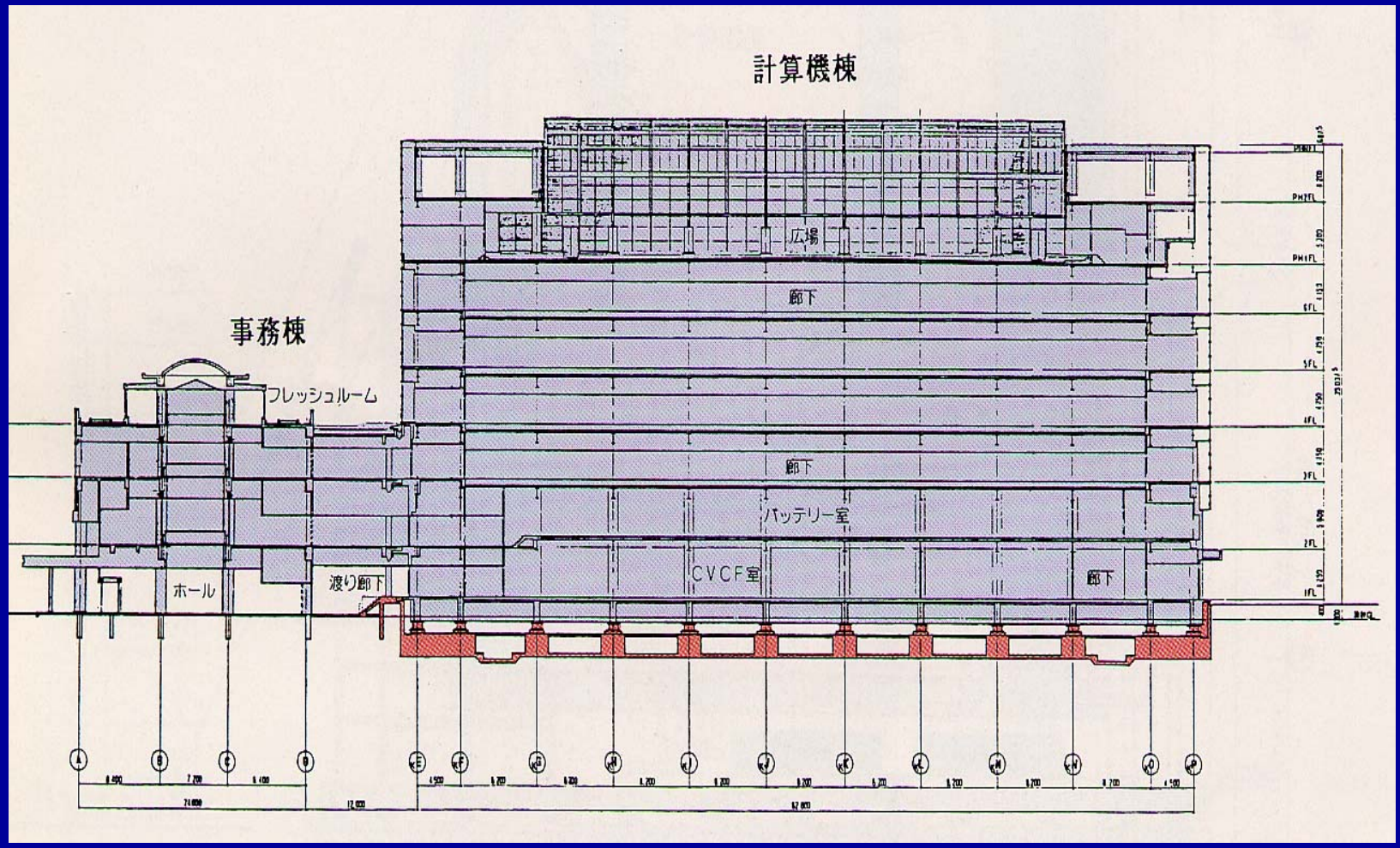


West post & communication building– with isolation

53965 m^2 **electric and computer facilities**



West post & communication building—with isolation



Japan Kobe Earthquake 1995.1.17 5:47 6,000

Japan Kobe Earthquake 1995.1.17 5:47 6,000

Seismic Isolation-Application in Japan (3)

West post & communication building-- with isolation

房屋加速度

隔震/不隔震

0.075g /0.965g

提高安全度 12倍

日本阪神地震 隔震房屋隔震效果记录

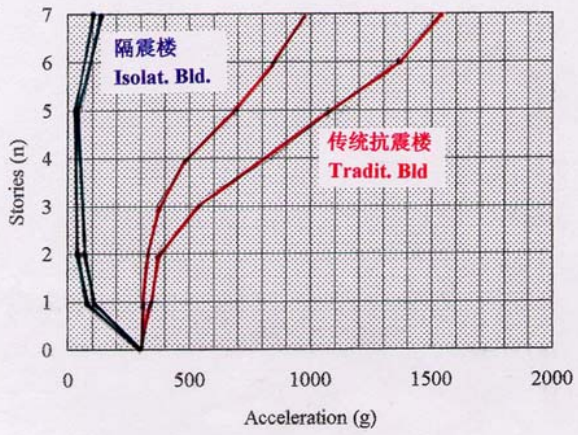
Record of Kobe EQ for Isolation Building

时间： 1995 年 1 月 17 日 Jan. 17, 1995

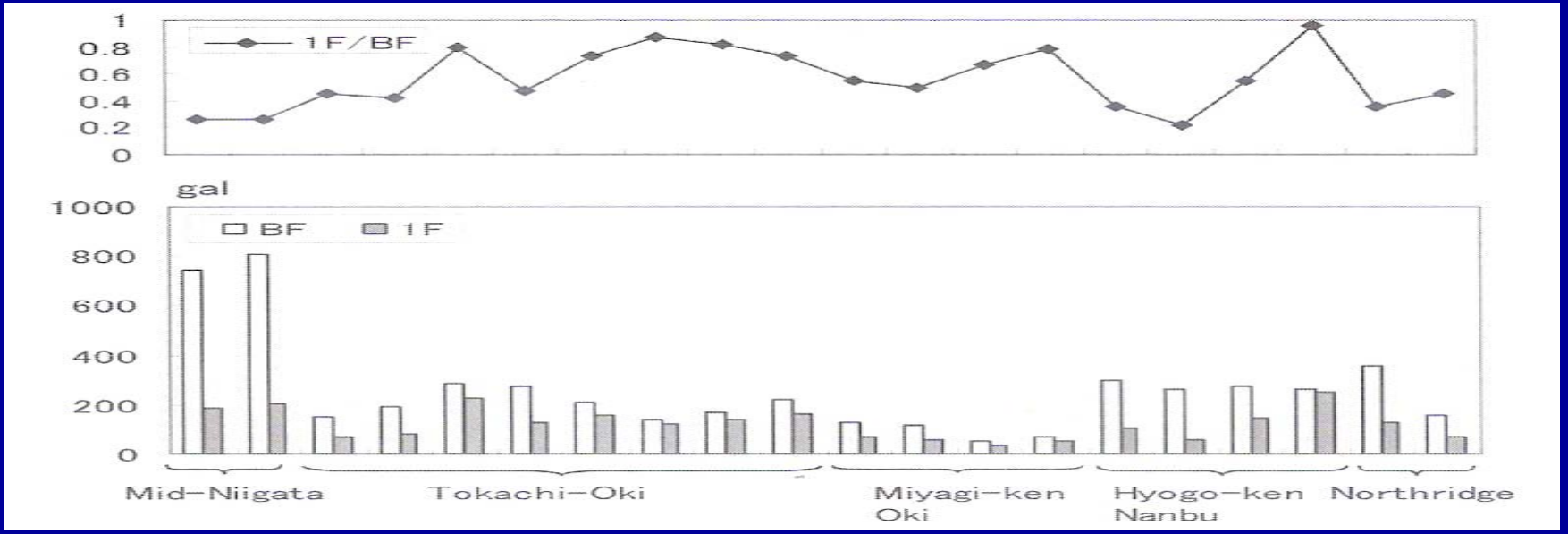
震级： M 7.2

房屋： 西部邮电大楼 West Post Center

地震动方向	地下室基础 最大加速度 g Acce. of base	西部邮政隔震楼 最大加速度 g Isolated Building 第1层 1st	西部邮政隔震楼 最大加速度 g Isolated Building 顶层(6) roof	传统抗震房屋 最大加速度 g Traditional Bld. 顶层 roof	隔震 / 传统抗震 Isola / Tradi. 顶层 roof
东—西 east- west	0.300	0.106	0.103	0.677	0.15
南—北 south-north	0.263	0.057	0.075	0.965	0.07
垂直 Vertical	0.213	0.193	0.377	0.368	1.02

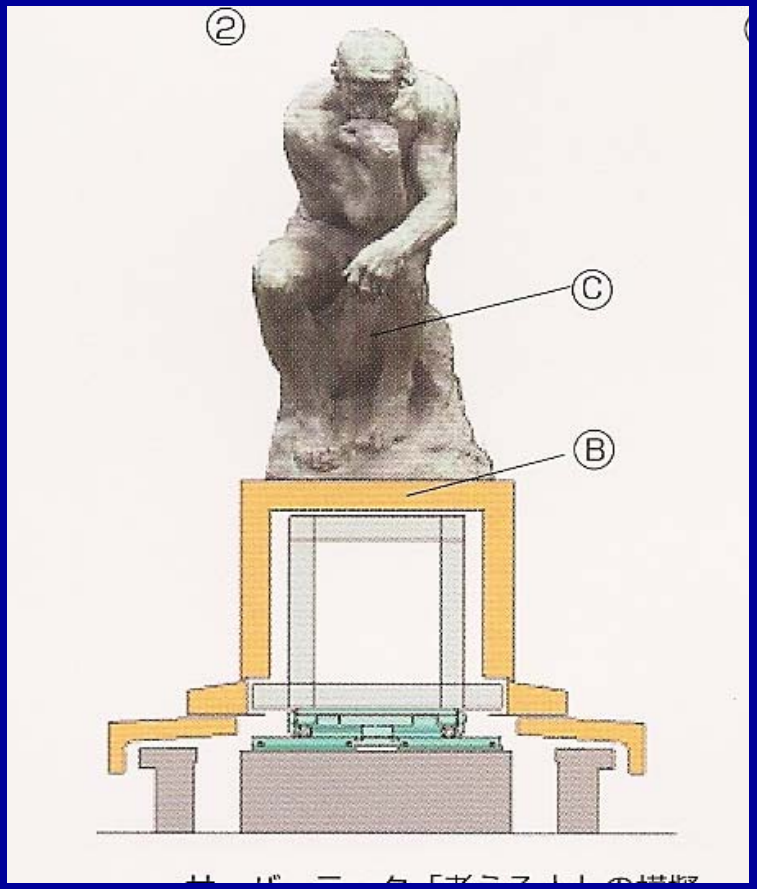


日本 19栋 多高层隔震房屋
地震考验记录



1. 地震反应：隔震房屋/地面 = 1/1.3～1/3.5
   隔震房屋/不隔震 =1/2.8～1/8
2. 地震越大，隔震效果越明显 （安全性提高 3～8倍）
3. 竖向地震作用放大系数 0.9-1.3，优于传统结构2.3

隔震 雕像文物



隔震设计规范，规程
隔震支座产品标准

设计规程 和 产品标准体系 初步形成

《建筑抗震设计规范》GB50011-2001，第12章(修订)

《叠层橡胶支座隔震技术规程》CECS126.2001

《建筑隔震橡胶支座》2000，建设部产品标准

《建筑与桥梁 橡胶隔震支座》 标准
（中国国家标准） 2005

国际标准（2005）

Isolation Rubber Bearing 橡胶隔震支座

ISO 22762-1 试验方法
ISO 22762-2 桥梁隔震支座
ISO 22762-3 建筑隔震支座

编制：日本，美国，中国　　主编 （2001-2005）

中国已能提供“质量高，价格适当”的产品系列

直径：ϕ300 – ϕ1300

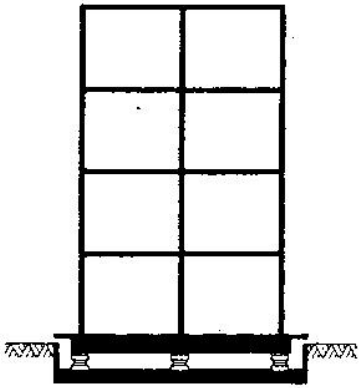
型号：有铅（大阻尼）
无铅（小阻尼）

性能：中柔性（中等刚度）
高柔性（低刚度）

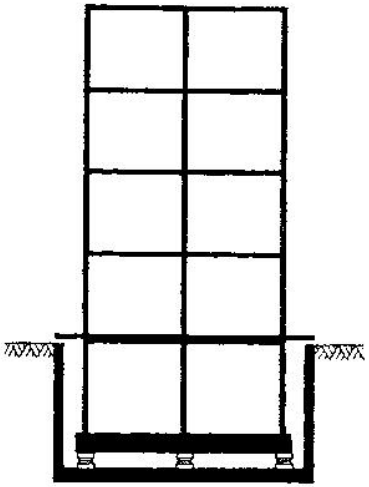
满足需要，出口日本，俄罗斯等

4. 隔震设计及个案分析

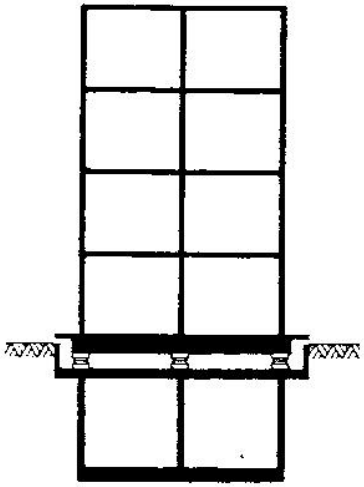
结构隔震层的位置



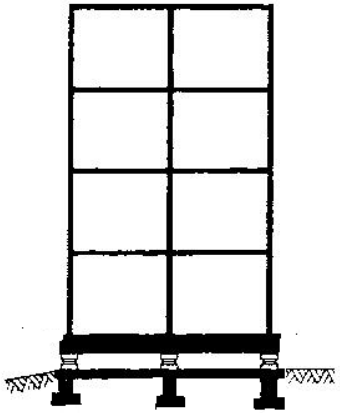
(a) 基础隔震



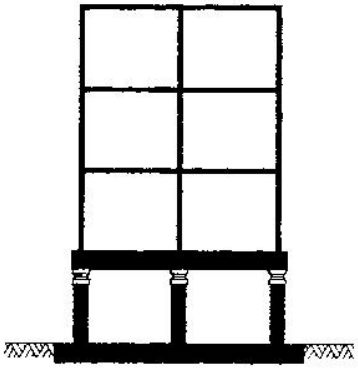
(b)基础隔震



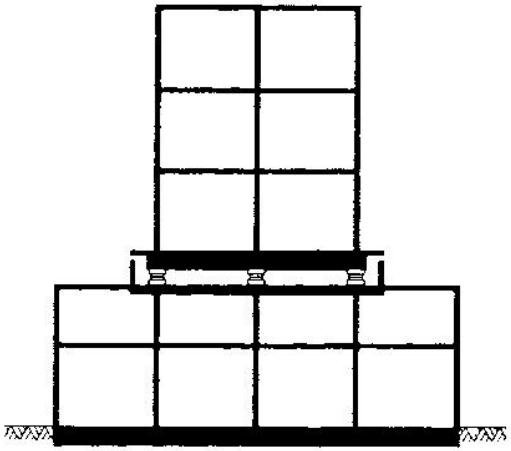
(c) 首层底隔震



(a) 基础隔震

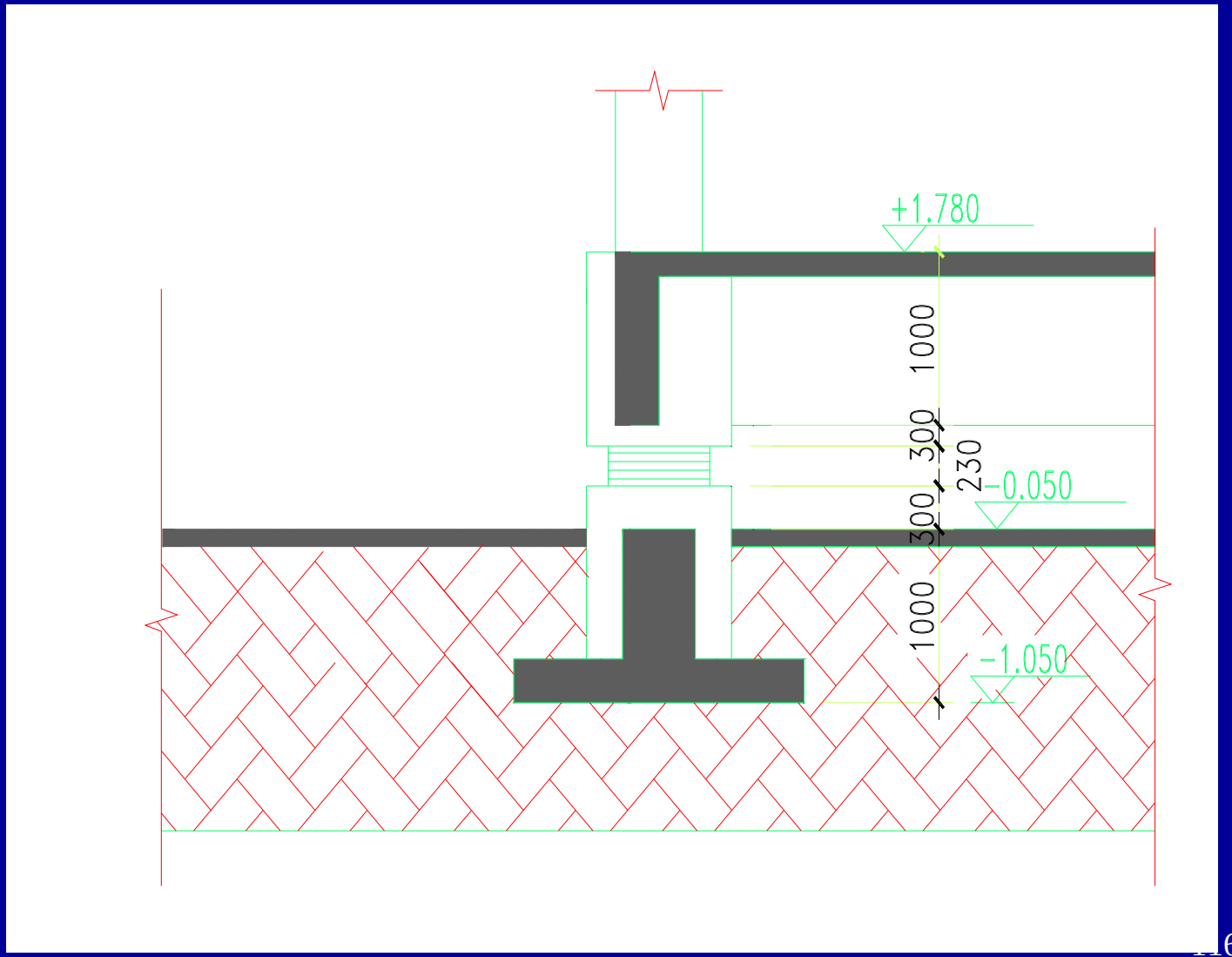


(e)首层顶隔震



(f) 层间隔震

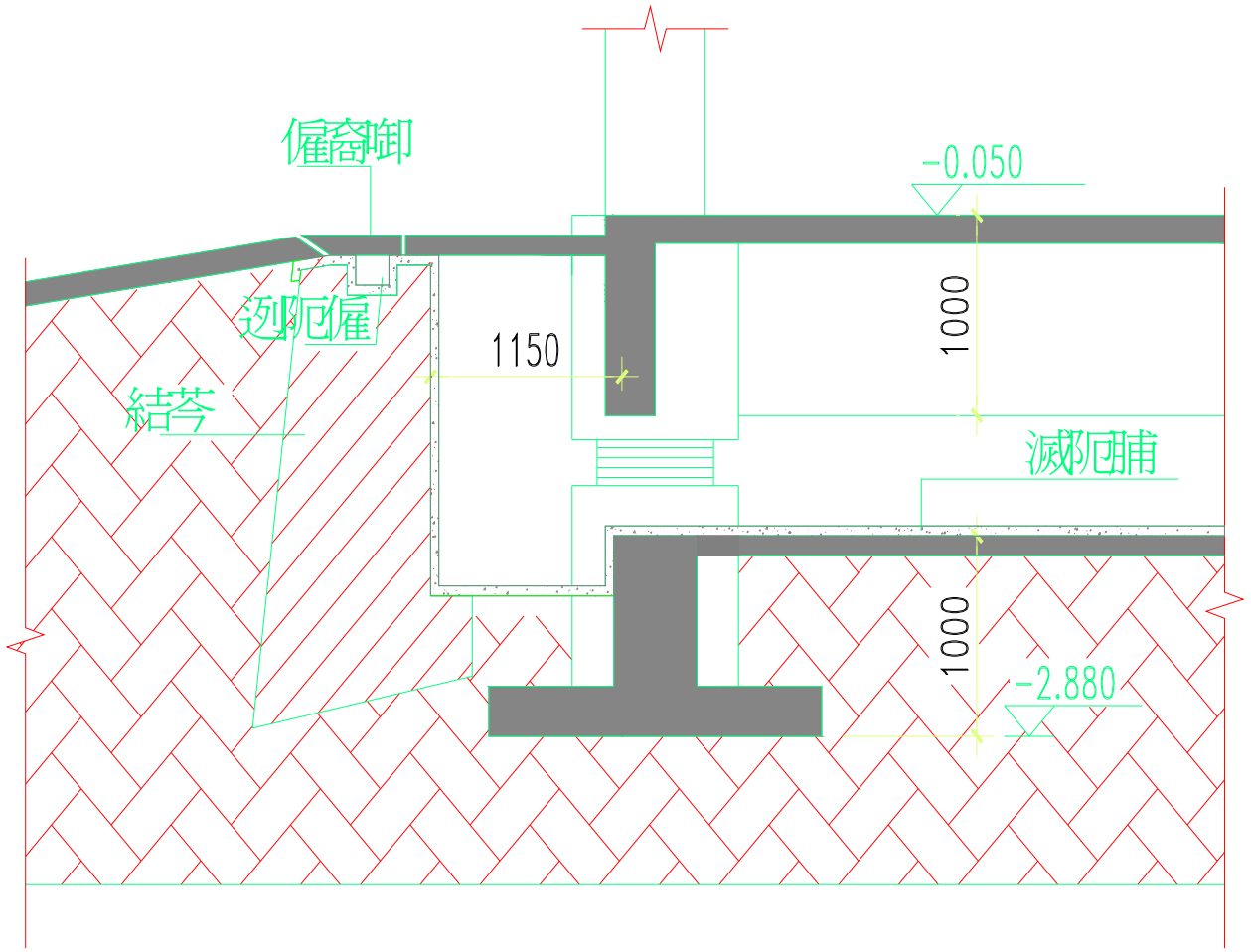
构造设计实例 1号 (抬高型)



House building (1995)

隔震 支座

构造设计实例 2（下沉型）



结构隔震房屋的构造设计和典型构造作法(4)

水平缝h1：

上部结构与周围水平方向固定物脱开距离 h1 ≥200mm,

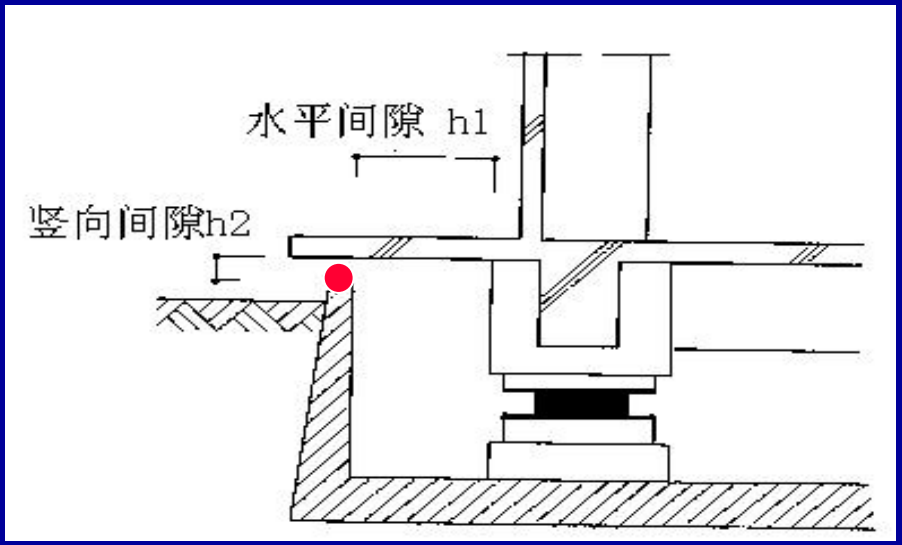
h1 ≥1.2 D

（ D — 隔震层在罕遇地震下最大位移 ）

竖向缝h2：

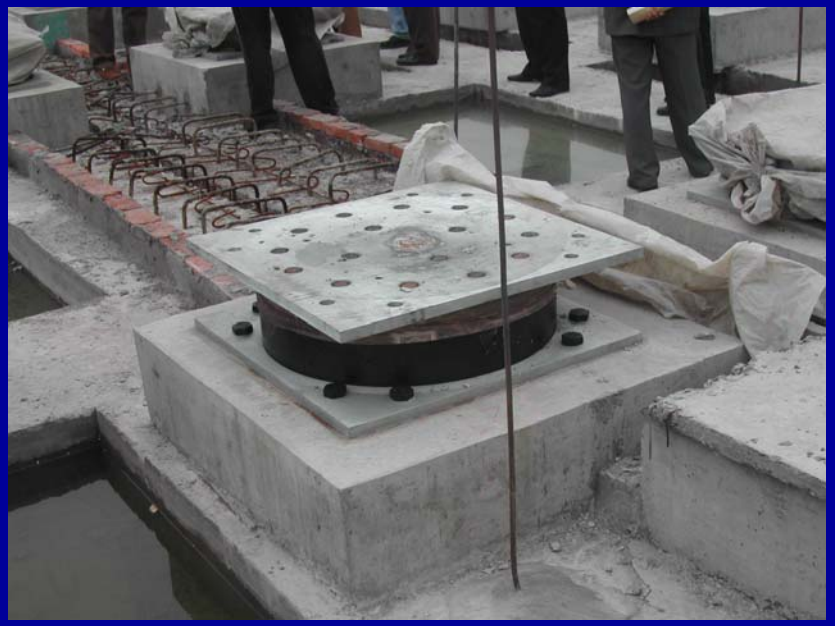
上部结构与周围竖直方向固定物的脱开距离h2≥15mm。

竖向缝隙用柔性材料填塞, 以防风、尘、水、、虫、鼠进入



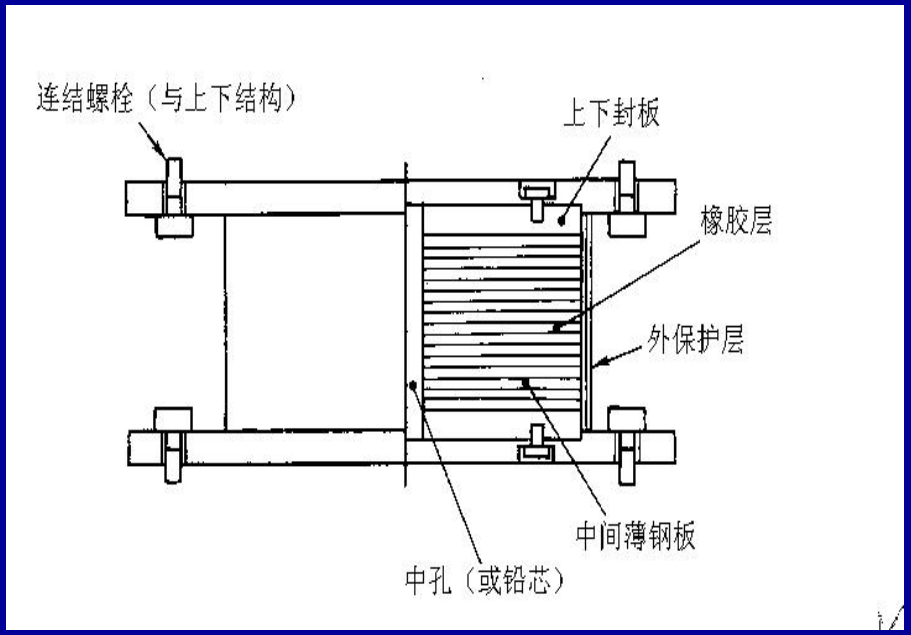
隔震住宅 Seismic Isolation

北京地铁 地面枢纽站 RC平台上
隔震支座 施工安装



结构隔震房屋的构造设计和典型构造作法(3)

隔震支座与上、下部结构应有可靠的的连接



结构隔震房屋的构造设计和典型构造作法(7)

穿过隔震层的竖向管线：

(1) 直径小的柔性管线 （电线, 避雷线）:

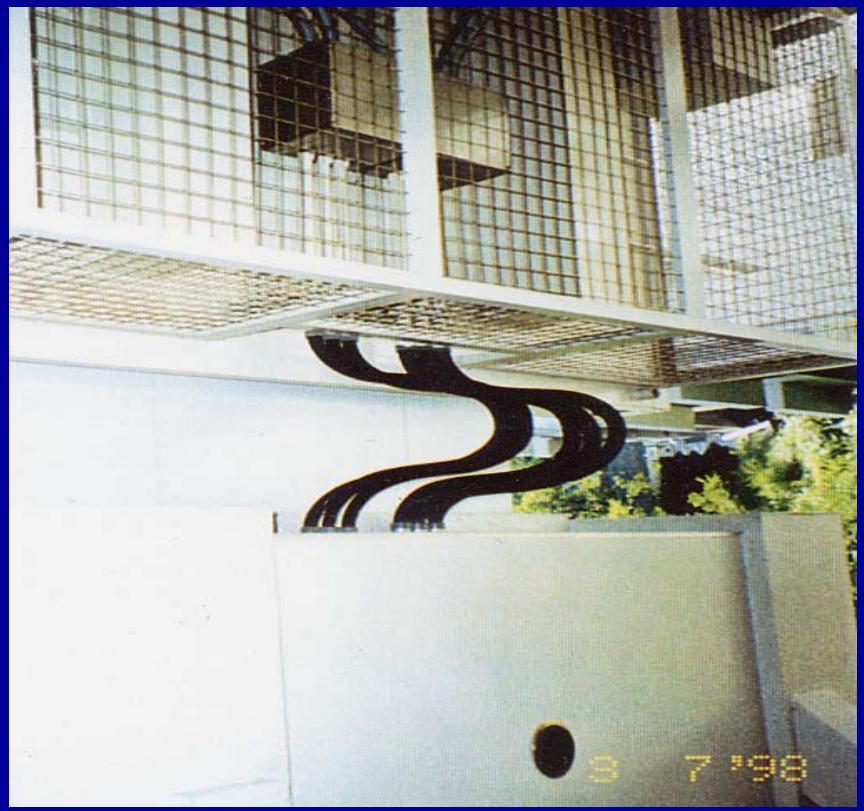
预留伸展长度

(2) 直径较大或重要的管道(排水管, 热水管, 煤气管):

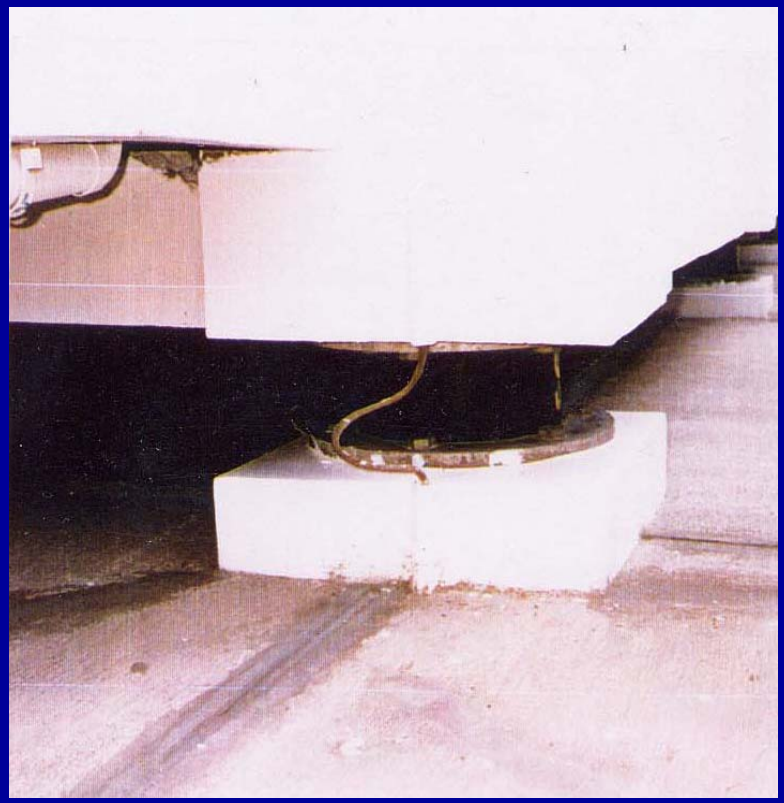
采用柔性管材

(3) 踏步, 楼梯： 断开

电线

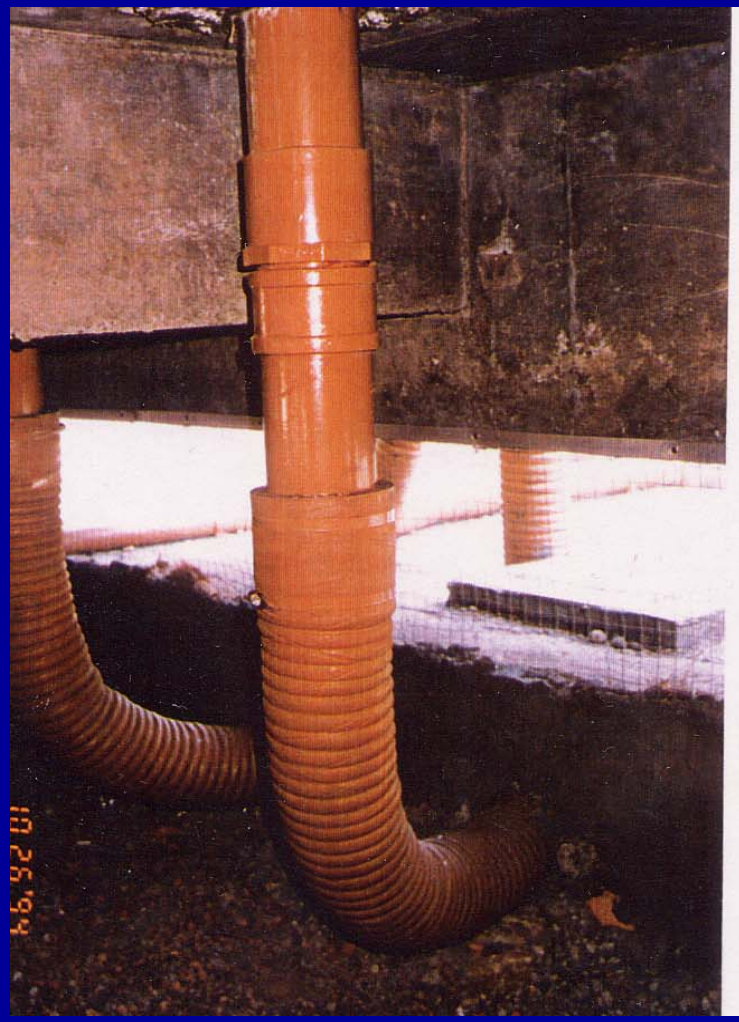


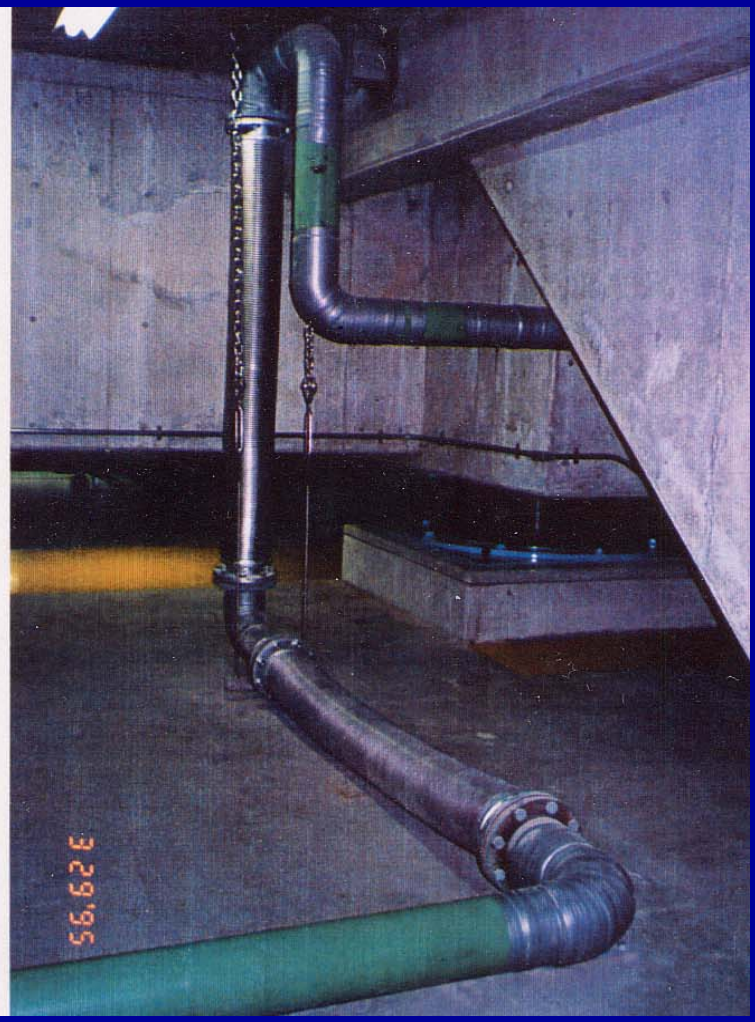
避雷线



排水管

热水管，煤气管





踏步

楼梯

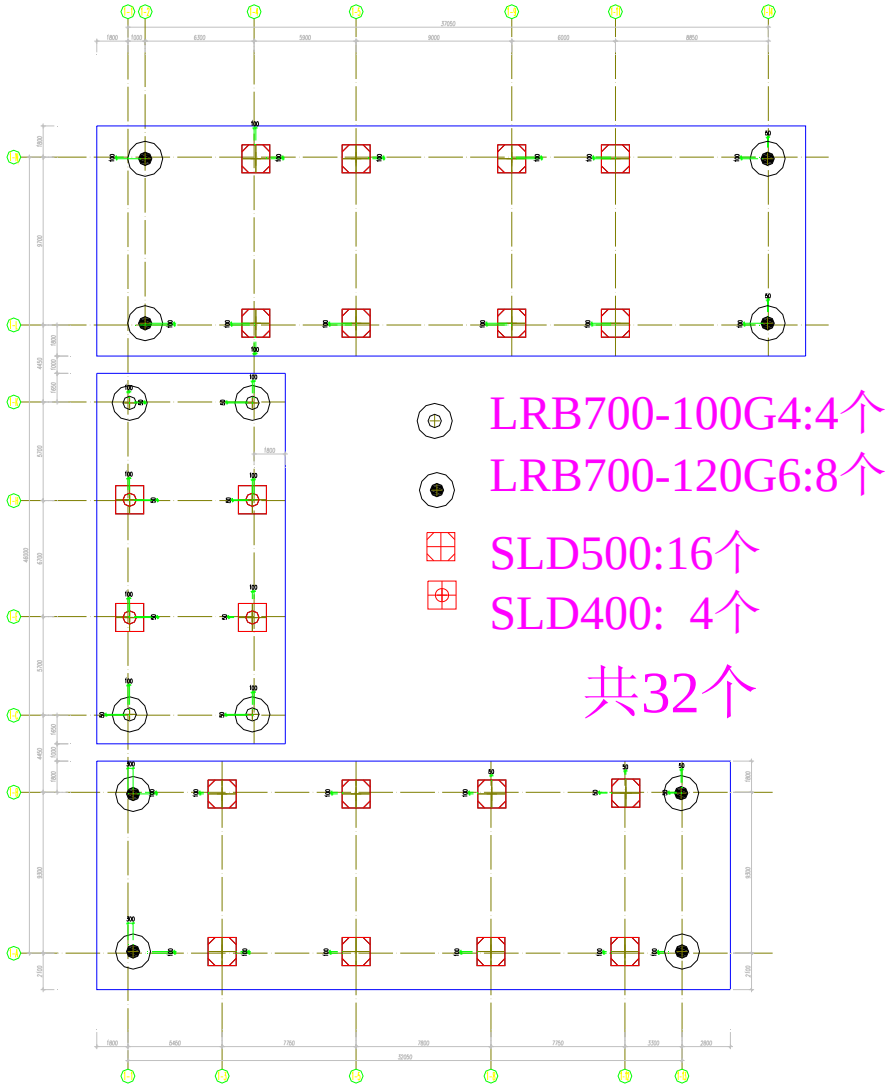
设计计算实例:汶川县第一幼儿园

抗震设防类别为重点设防类(乙类)

3层框架结构

3栋采用隔震技术

汶川县第一幼儿园（平面布置）



LRB700-100G4:4个

LRB700-120G6:8个

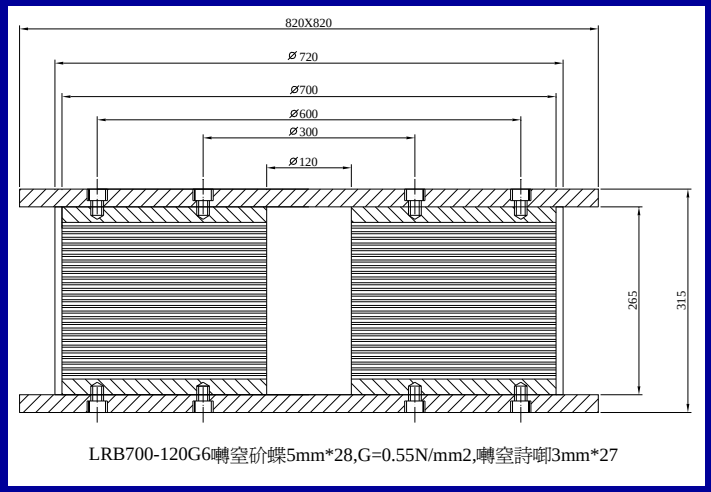
SLD500:16个

SLD400: 4个

共32个

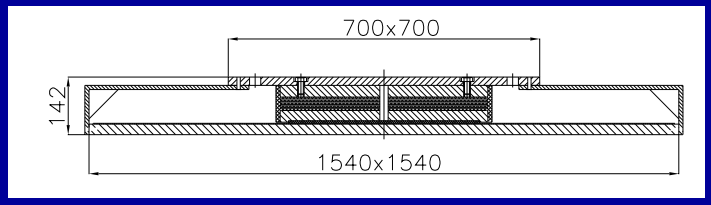
隔震层支座布置图

平面布置图



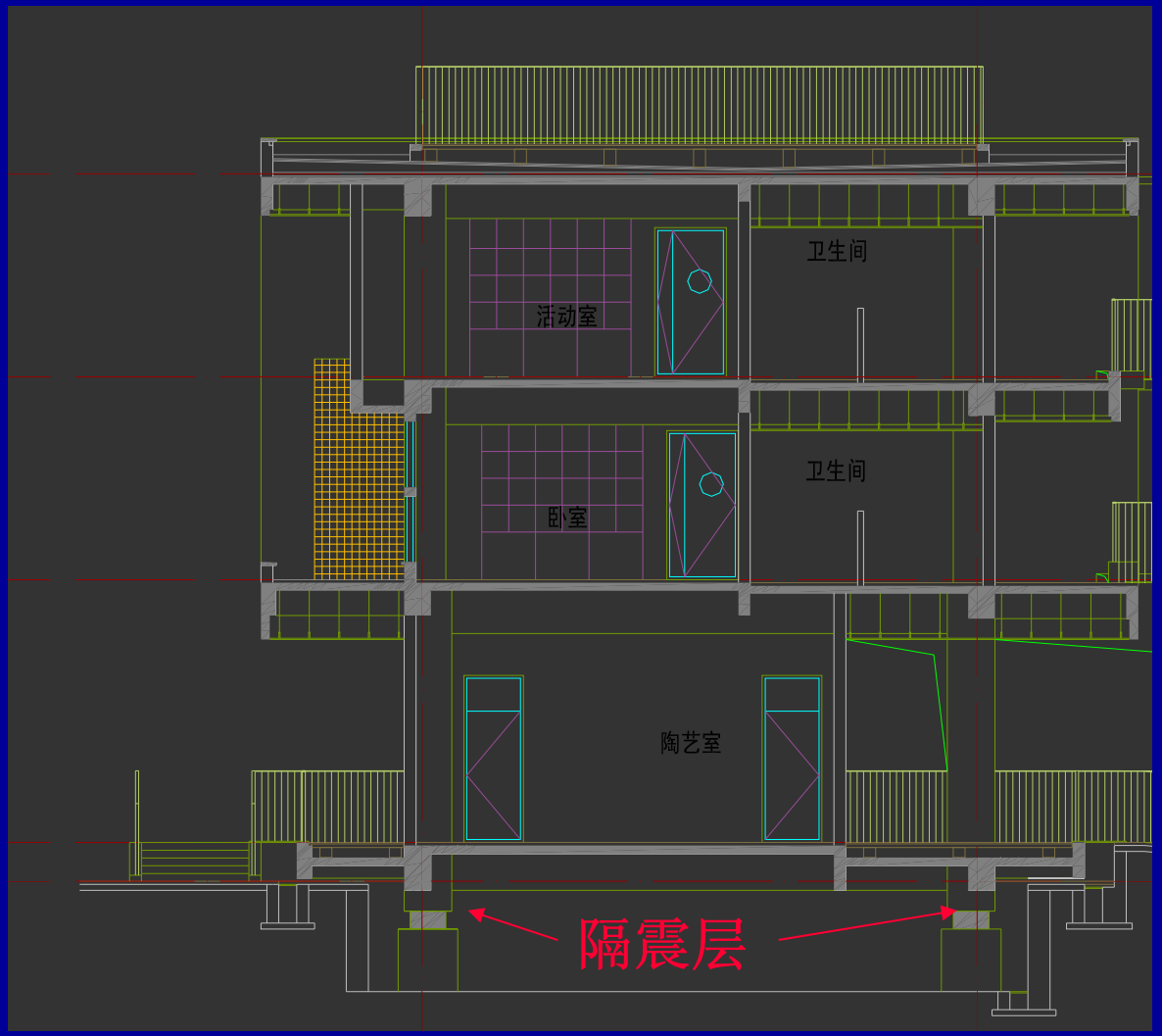
LRB700-120G6嘯窒矽蝶5mm*28,G=0.55N/mm2,嘯窒詩喇3mm*27

LRB700-120G6



SLD500支座尺寸

汶川县第一幼儿园（剖面图）



建筑剖面图

汶川县第一幼儿园（结构参数）

工程抗震设防参数

抗震设防烈度	设计基本地震加速度值	设计地震分组	场地土类别	近场影响系数
8 度	0.20g	第一组	II类场地	1.5

本工程处于发震断层**5km**以内

隔震结构参数

结构	重量 W(kN)	隔震层性能（100%）			
		k_d (kN/mm)	Q_d (kN)	隔震周期 T_g (s)	屈重比 Q_d/W
1#楼	29397	6.056	1231.8	4.42	4.2%
2#楼	14056	4.296	587.9	3.63	4.2%
3#楼	35653	6.056	1380.1	4.87	3.9%

隔震结构设计目标：大震弹性,双保护,上部结构降**1**度设计

汶川县第一幼儿园（隔震支座性能设计值）

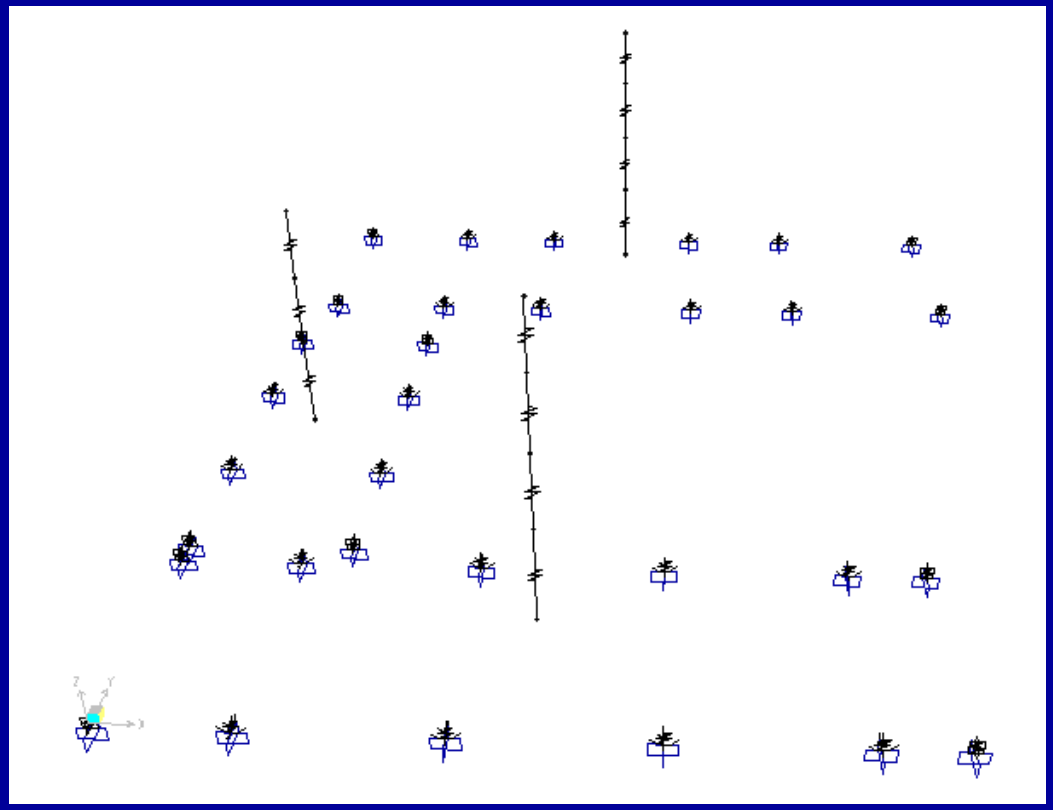
橡胶支座设计值

支座类型	橡胶层厚度 T_r (mm)	屈服后刚度 k_d (kN/mm)	屈服力 Q_d (kN)	竖向刚度 k_v (kN/mm)	极限变形 δ_{max} (mm)
LRB700-100G4	140	1.075	62.6	3259	500
LRB700-120G6	140	1.514	90.2	3522	500

弹性滑板支座设计值

支座类型	橡胶层厚度 T_r (mm)	屈服前刚度 k_1 (kN/mm)	摩擦系数 μ	竖向刚度 k_v (kN/mm)	最大变形 δ_{max} (mm)
SLD400	20	2.430	0.04	4807	500
SLD500	20	3.796	0.04	9621	500

汶川县第一幼儿园（时程计算:计算模型）

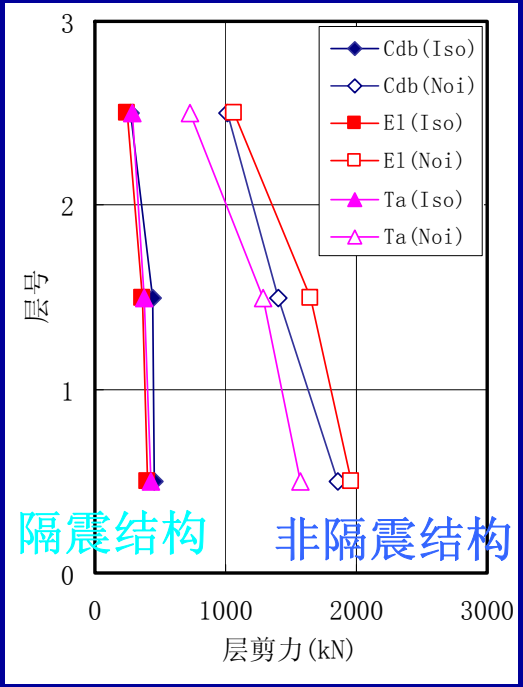


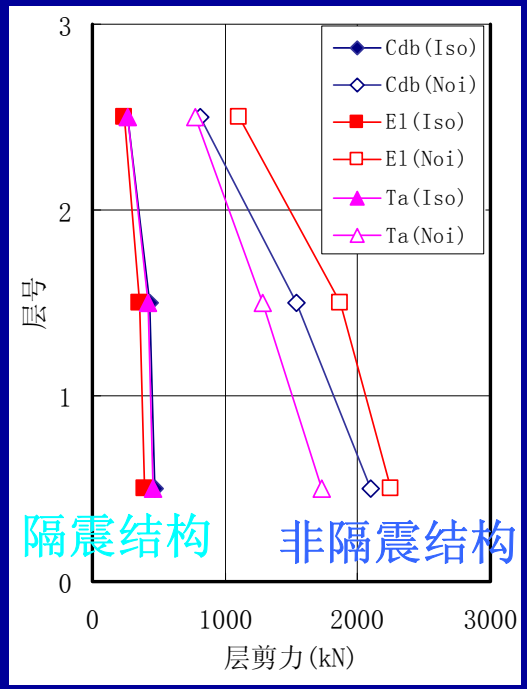
计算模型

设防烈度：8 度
近场影响系数：1.5
小　震：0.105 g
中　震：0.210g
大　震：0.60g

地震波：
El Centro (NS)
Taft (EW)
人工波

汶川县第一幼儿园（时程计算:剪力比）





层剪力比最大值

隔震/非隔震

1#：0.262

2#：0.292

3#：0.238

抗震安全度提高 **4** 倍

多遇地震下2#上部结构层间剪力包络图

汶川县第一幼儿园（时程计算：层间位移角）

罕遇地震下 2#上部结构 X 向层间位移角倒数（1/θ）

地震波 / 层号	隔震结构 X 向层间位移角倒数（1/θ）			
	场地波	El Centro 波	Taft 波	平均值
3	613.5	725.9	742.8	694.1
2	515.0	632.6	717.8	621.8
1	395.7	470.6	529.7	465.3

罕遇地震下 2#上部结构 Y 向层间位移角倒数（1/θ）

地震波 / 层号	隔震结构 Y 向层间位移角倒数（1/θ）			
	场地波	El Centro 波	Taft 波	平均值
3	778.4	1340.0	1146.8	1088.4
2	616.7	804.7	830.3	750.6
1	393.3	481.5	507.7	460.9

大地震时,上部结构的层间位移角 **< 1/500,** 处于弹性

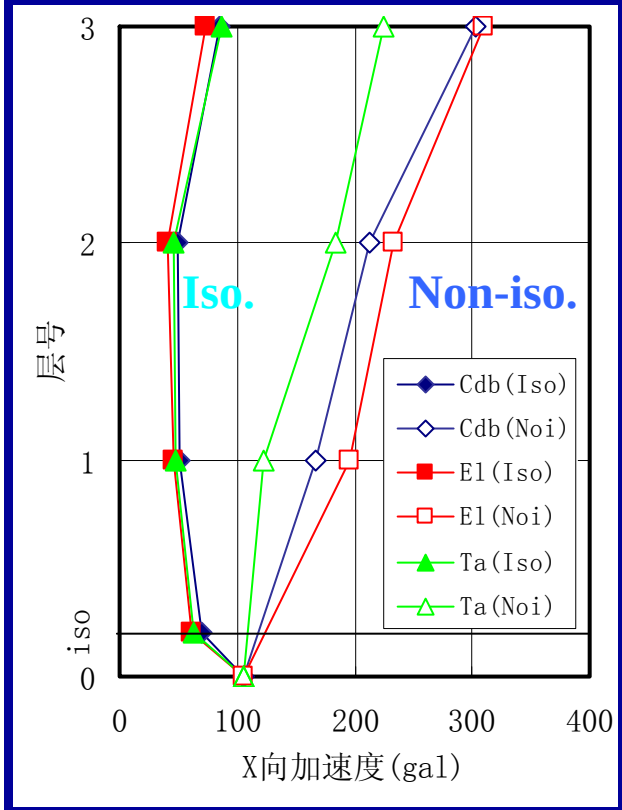
汶川县第一幼儿园（时程计算:支座最大位移）

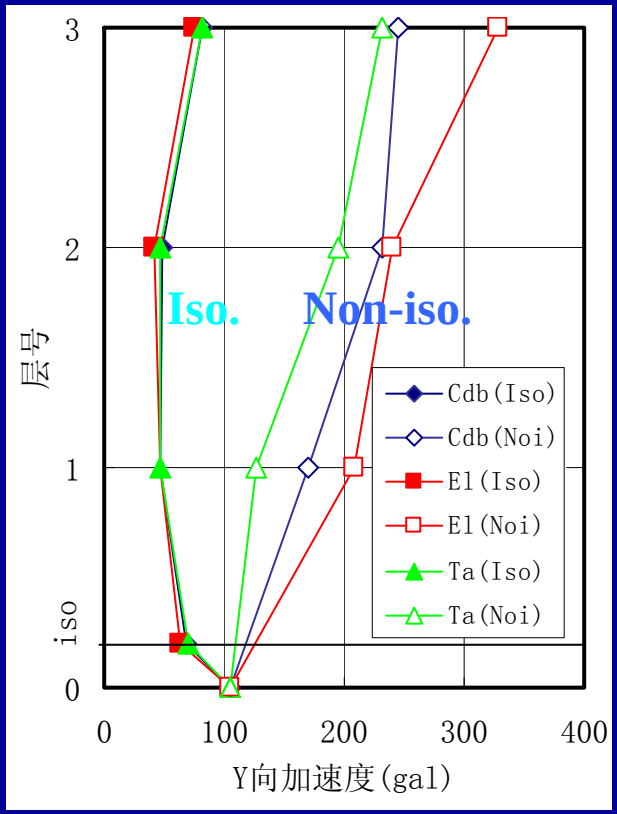
罕遇地震下隔震层的最大水平位移

地震波 / 方向		最大水平位移(mm)				最大容许位移(mm)
		场地波	El Centro 波	Taft 波	平均值	
1#	X 向	378.6	249.7	258.4	295.6	385
	Y 向	379.4	249.5	258.8	295.9	
2#	X 向	347.7	266.4	241.8	285.3	
	Y 向	346.7	267.0	240.4	284.7	
3#	X 向	469.3	273.0	272.0	338.1	
	Y 向	470.1	273.8	272.0	338.6	

隔震层最大位移满足支座最大容许位移的要求

汶川县第一幼儿园（时程计算:加速度比）





多遇地震下2＃上部结构加速度包络图

顶层加速度比

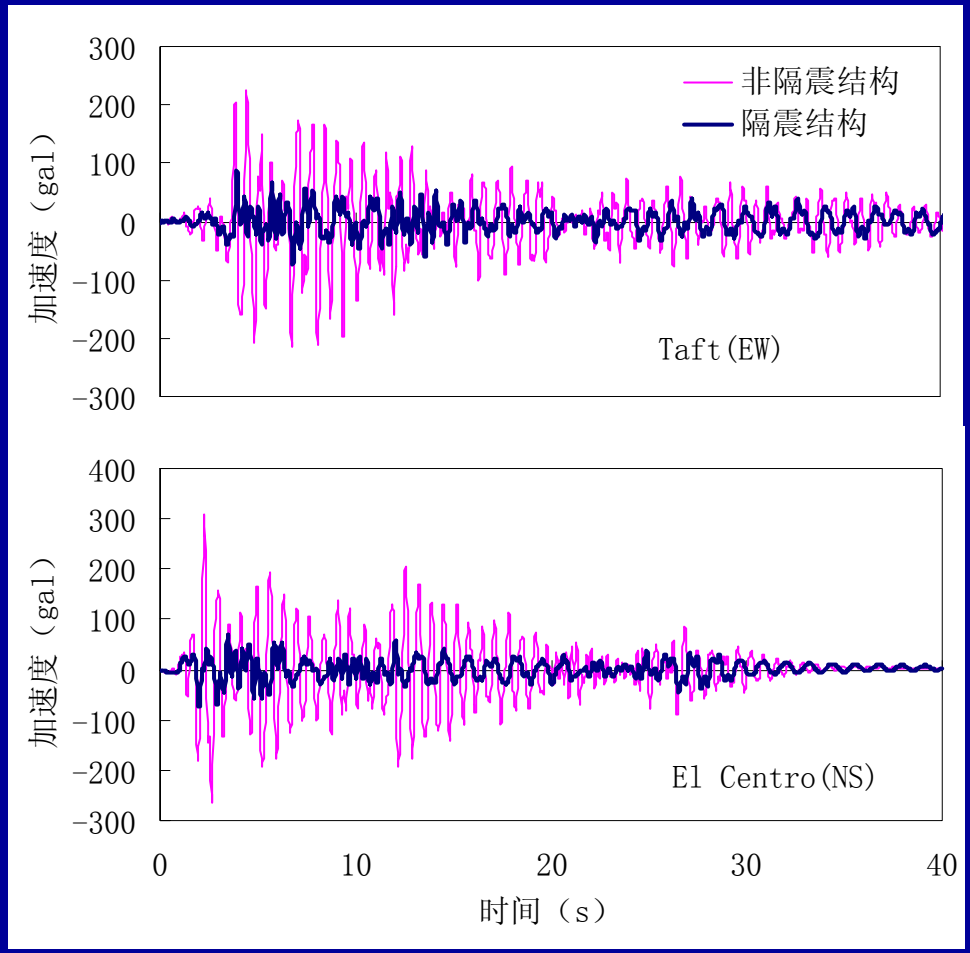
隔震/非隔震

1＃：0.221
2＃：0.296
3＃：0.228

抗震安全度
提高 4 倍

双保护
结构和室内

汶川县第一幼儿园（时程计算:加速度时程比）



多遇地震下2#顶层加速度时程

隔震的技术经济性

隔震结构 对比 传统抗震结构：

1. 大地震时安全：隔震结构地震反应降为 1/3-1/10 ，
   （安全度提高3-10倍）
   大震时房间弹性，不坏不倒，住几代人生命财产安全！
2. 双保护对象，生命线工程：
   保护结构，也保护室内设备仪器，使用功能不中断
3. 结构在大震时基本保持弹性：
   地震时结构基本保持弹性，保护非结构构件
4. 建筑设计自由：适用于规则结构，也适用于非规则结构
   平面不规则—隔震支座布置，调整刚度中心
   立面不规则—隔震支座布置在薄弱层，转换层
5. 结构造价不高：±5%， 约 120 - 200元/M^2 建筑面积

隔震技术特别适合使用于下列建筑物

1. 要求在地震中不能中断功能的建筑 （双保护）:
   医院
   政府指挥中心, 救灾指挥中心, 消防
   电讯, 电视大楼
   交通枢纽, 交通指挥中心, 机场, 车站
   电力, 供气
2. 有大量人群集中的建筑, (确保安全, 建成避难所)
   学校
   大型场馆, 影剧院
3. 有珍贵物品, 精密系统的建筑 （双保护）
   博物馆, 档案馆
   银行,
   计算中心, 有毒品的实验室
4. 重要住宅, 高安全性住宅 （确保安全）
5. 安全性要求较高的建筑, (确保安全)

5. 消能減震技术概念

结构消能减震设计概念

Energy Dissipation Device of Energy Dissipation system

1. 消震减震机理:

地震时, 地面震动能量输入结构

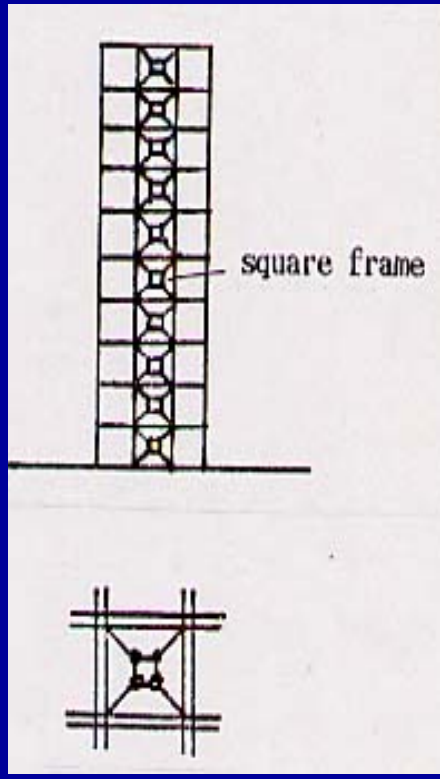
传统结构--承重构件(梁, 柱, 节点)

产生裂缝, 消能.

消能结构--非承重构件(支撑, 剪力墙)

产生阻尼 率先消能,

减低结构震动, 保护主体结构.



2. 目标:增大结构阻尼, 减少振动位移(20～40%)

3. 应用及构造:高层建筑, 利用支撑, 剪力墙

Energy Dissipation
Dynamic Analysis of Energy Dissipation

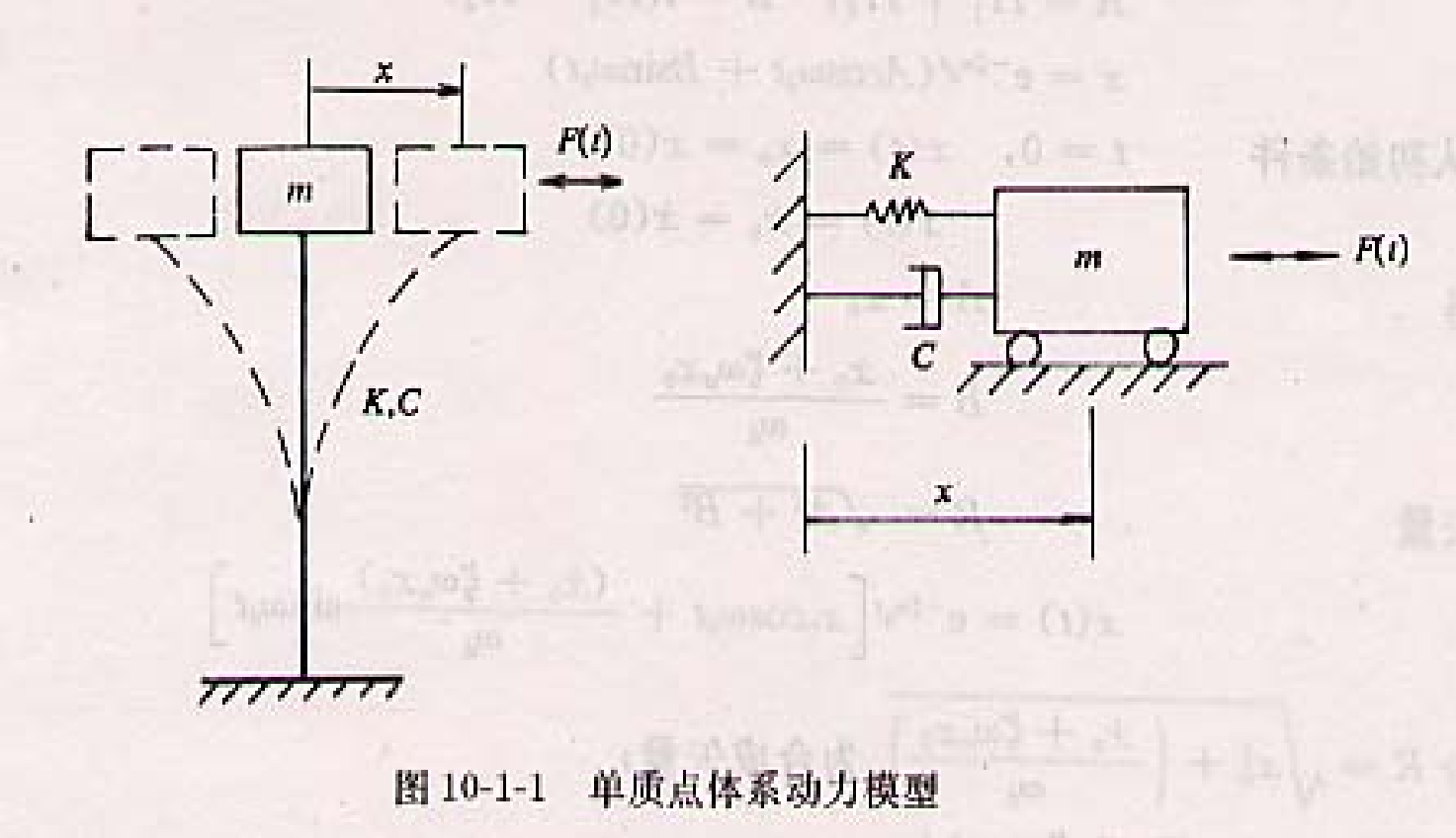


图 10-1-1　单质点体系动力模型

Model of single degree of freedom of E-D system

Energy Dissipation

Dynamic Analysis of Energy Dissipation (3)

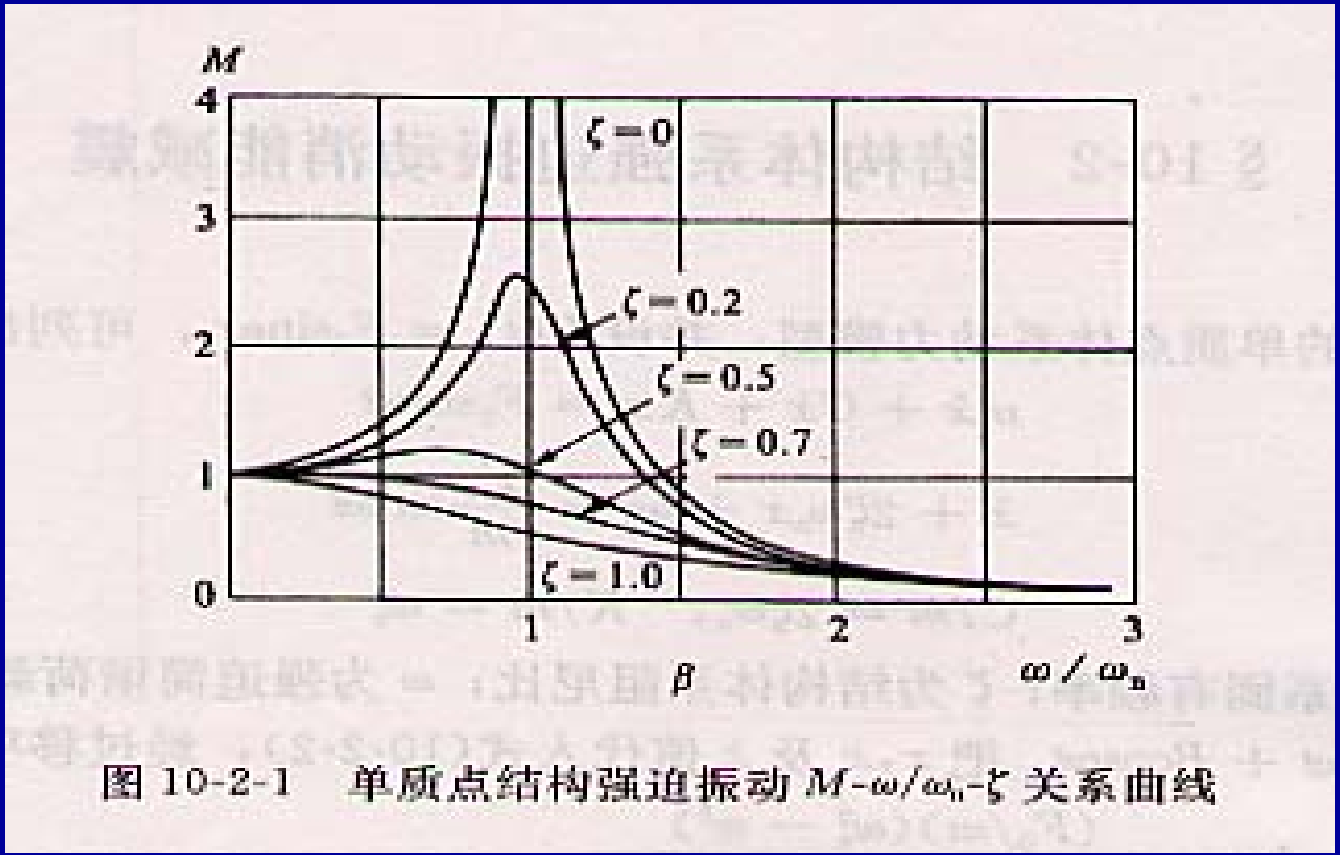
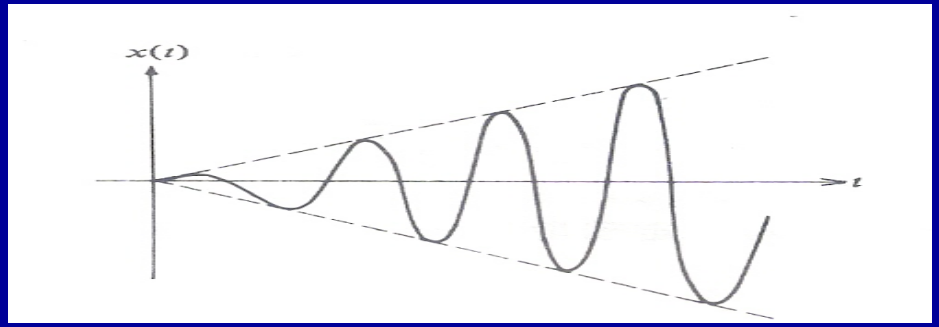


图 10-2-1　单质点结构强迫振动 M-ω/ω_n-ζ 关系曲线

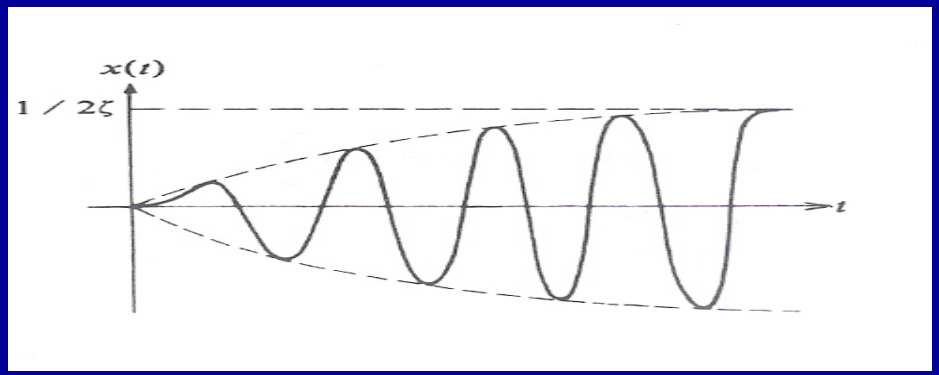
Relationship of M , ς and ω/ωn

消能减震—减小振动位移 20～40%

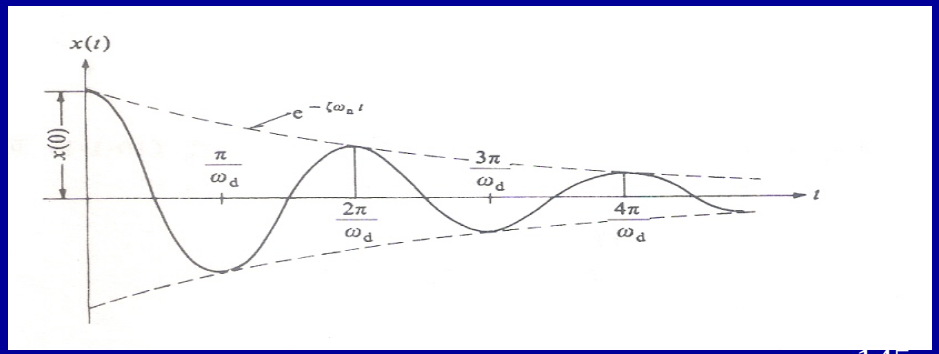
结构无阻尼



有小阻尼
（一般结构）

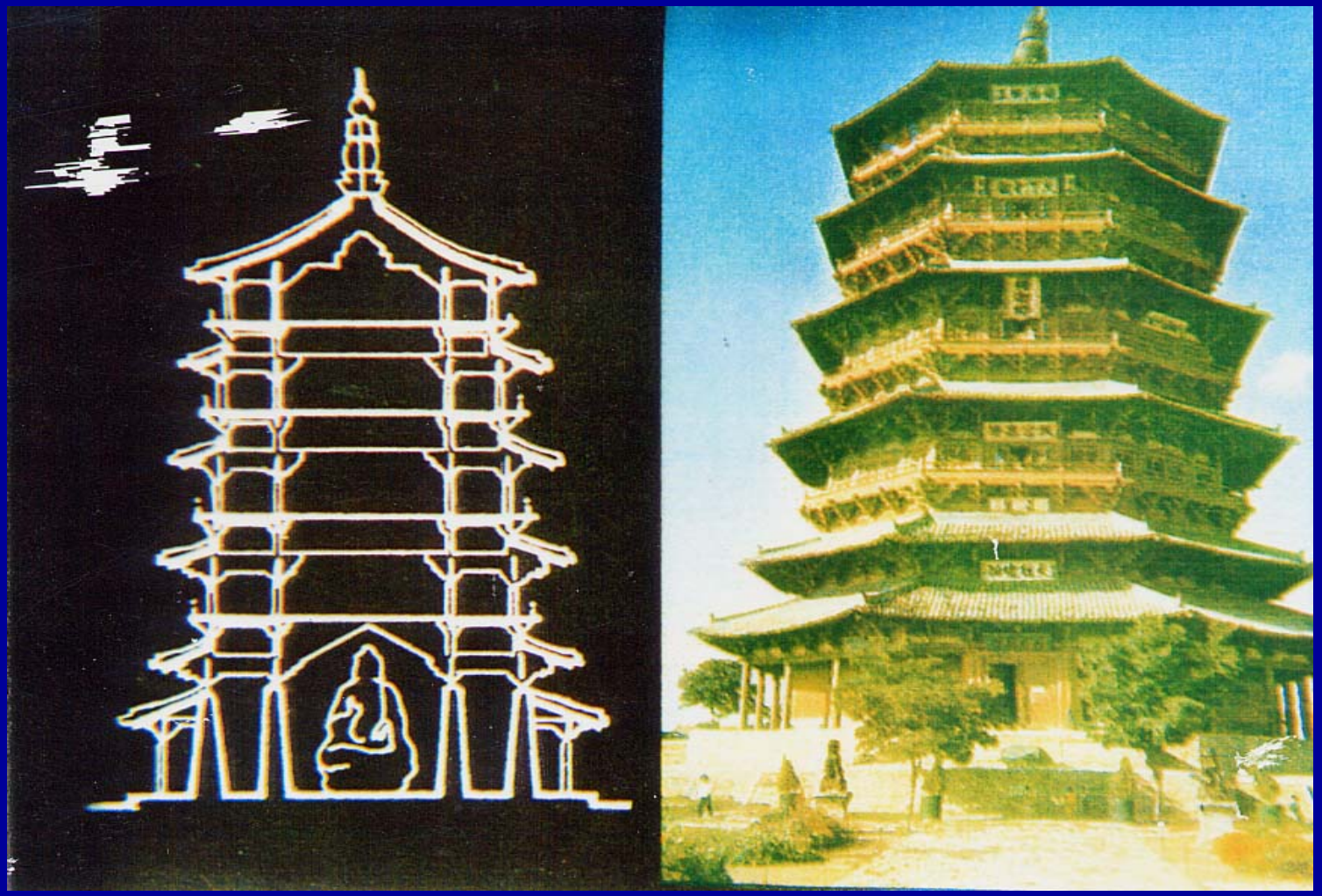


有大阻尼
（消能减震结构）



实录Ener. 消能壁 减震

山西古塔
Application in ancient buildings in China

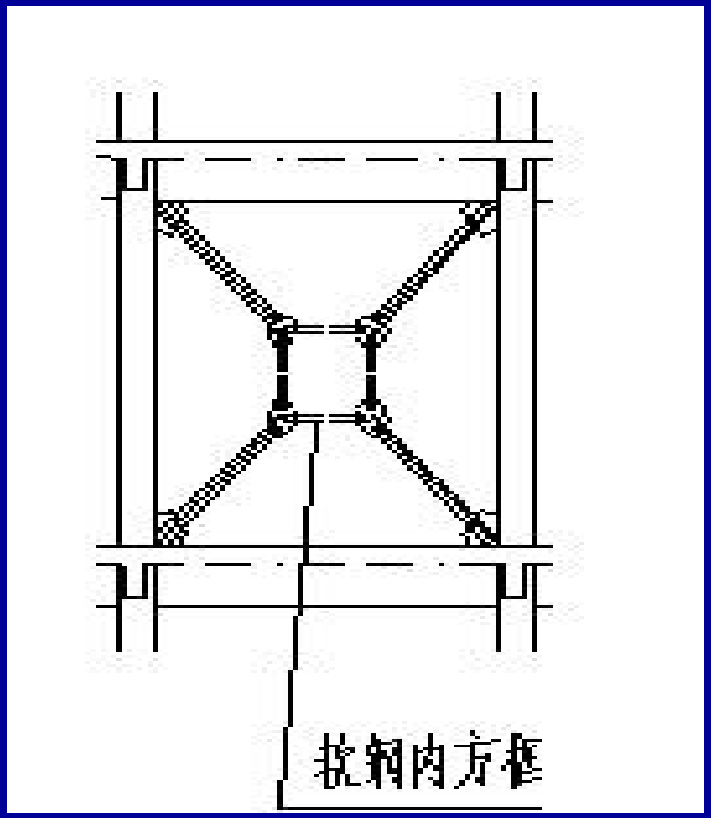


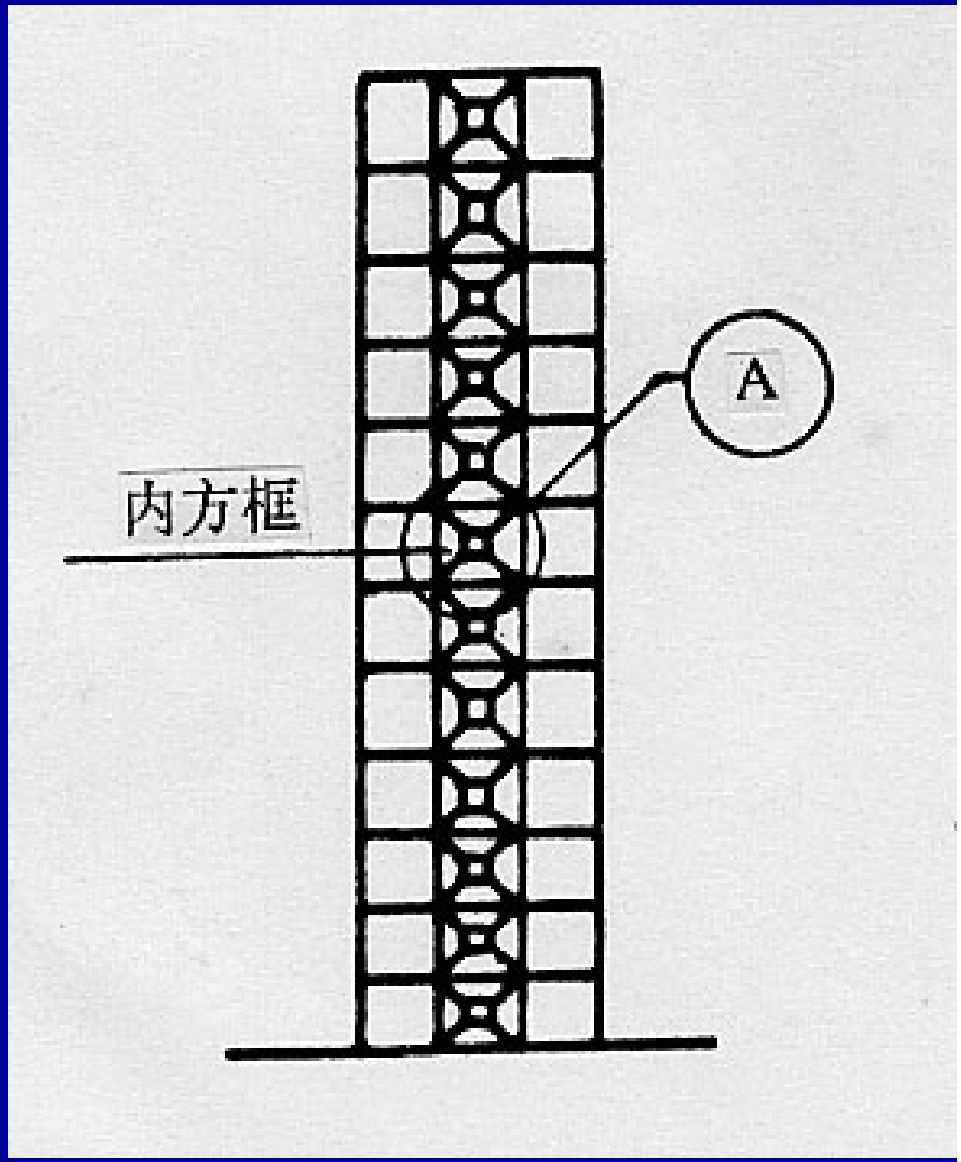
Shanxi, north China Built in 1056, experience 3 strong earthquakes

消能减震结构体系的分类

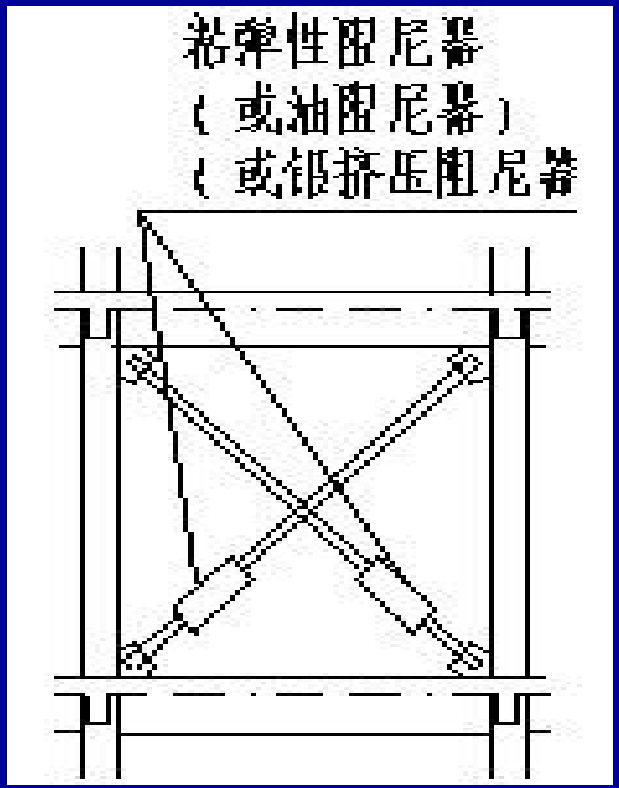
1. 位移相关型：性能与移动位移相关
   - 金属屈服型： 软钢，铅
   - 屈曲约束型： 软钢
   - 摩擦阻尼装置
2. 速度相关型：性能与移动速度相关
   - 粘滞型： 油阻尼器，质量泵
   - 粘弹型： 粘弹性材料
3. 其他：

金属屈服型：软钢





粘滞型:油阻尼器

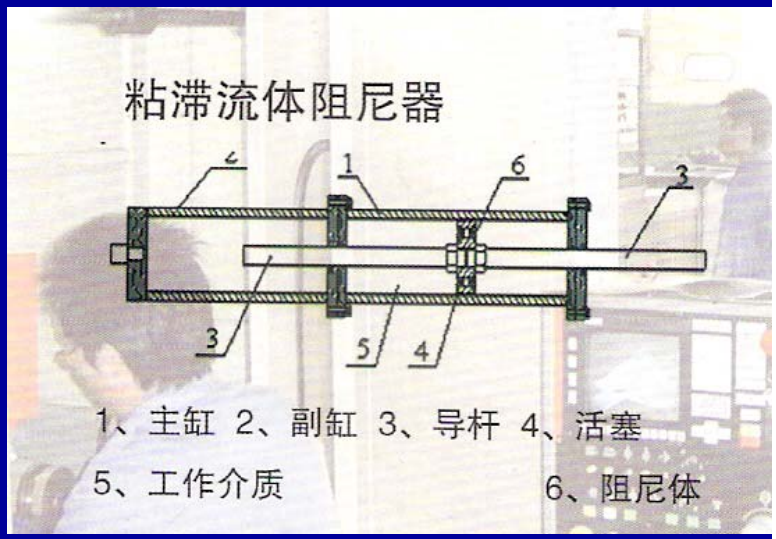


油阻尼器 high rise building with oil damper

油阻尼器 Office building in Shanhai

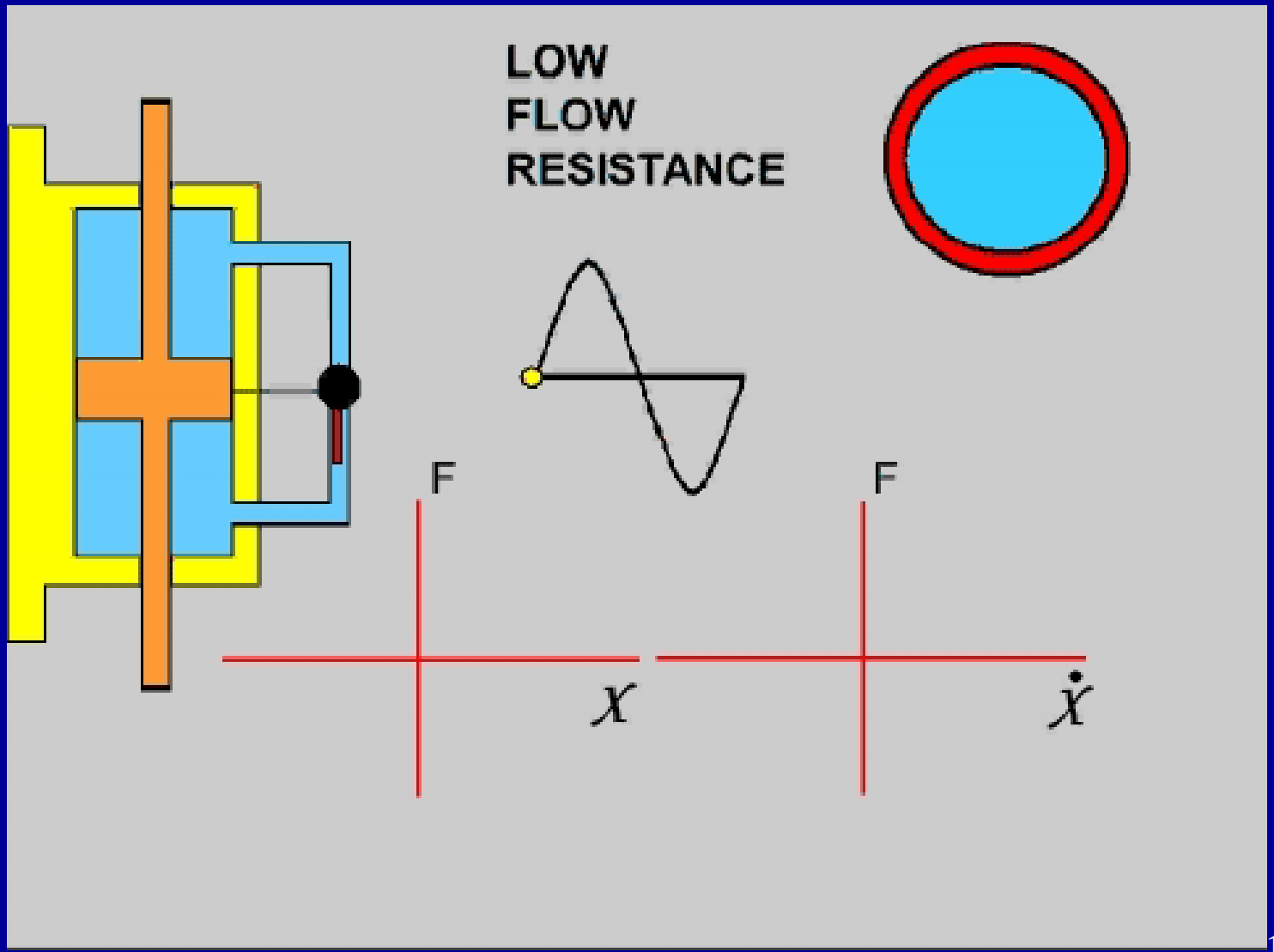
油阻尼器

长3.30M,
行程 ±1.2M



EAE-500

(M)Variable Stiffness or Damping



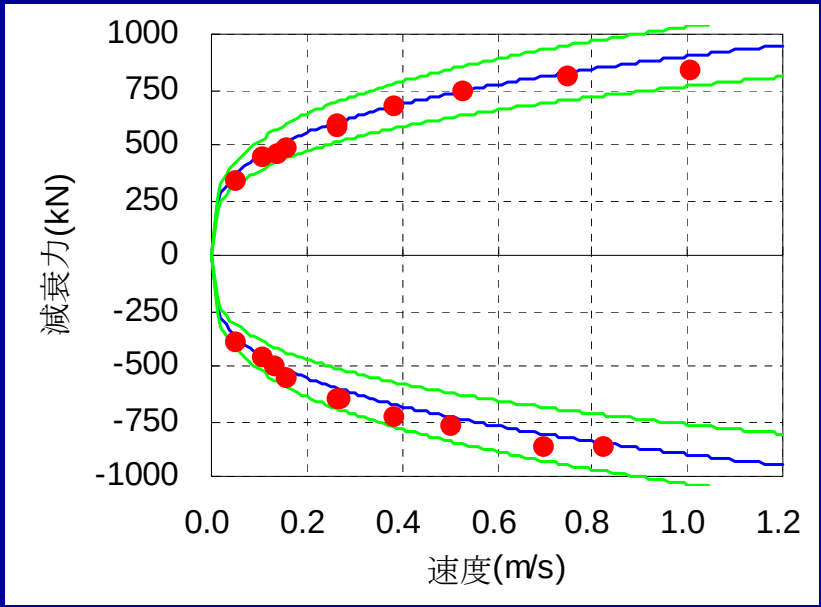
(M)Test of Oil Dampers

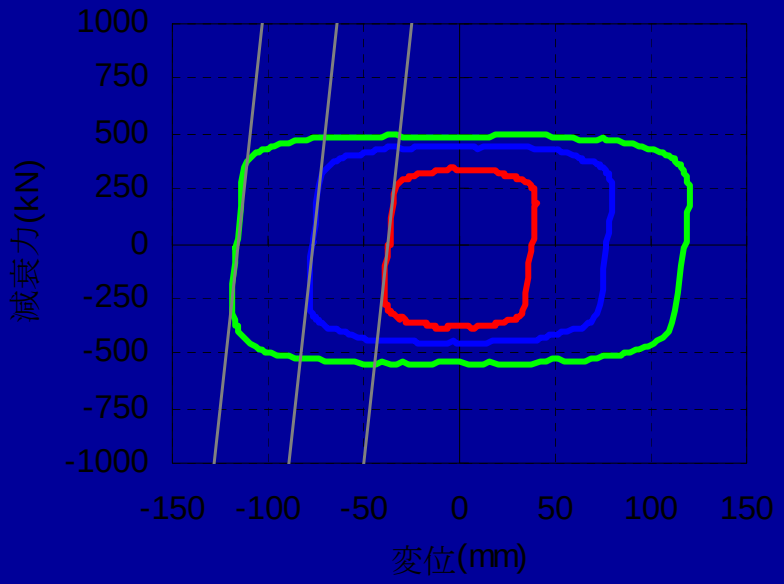
Testing is carried out in the Energy Dissipation Testing System

广州大学

上海材料研究所

油阻尼器性能試験結果（国产）





最大荷重－最大速度关係

荷重－变位关係

（加载频率 0.2Hz，　最大出力1000kN）

6. 抗震 消能减震 隔震的对比分析和应用

抗震、 隔震和消能减震技术原理对比分析

- 抗震:多处在 与地面振动 共振区,地震震动放大 2倍以上
- 消能 增大结构阻尼,

  减震20～40%,提高结构安全度

  震动放大系数仍 M≥1 （ 1.2-1.8 ）

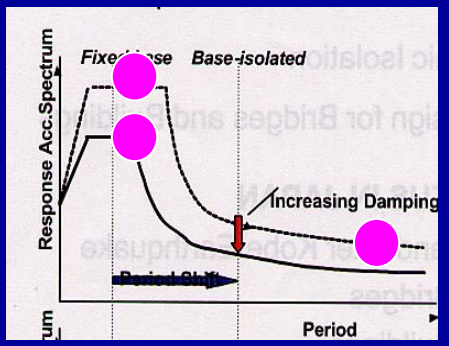
  目标:减低结构位移(地震变形)反应
- 隔震 通过延长自振周期,避开地面振动共震区,隔离地震

  减震60～90%,大大提高安全度

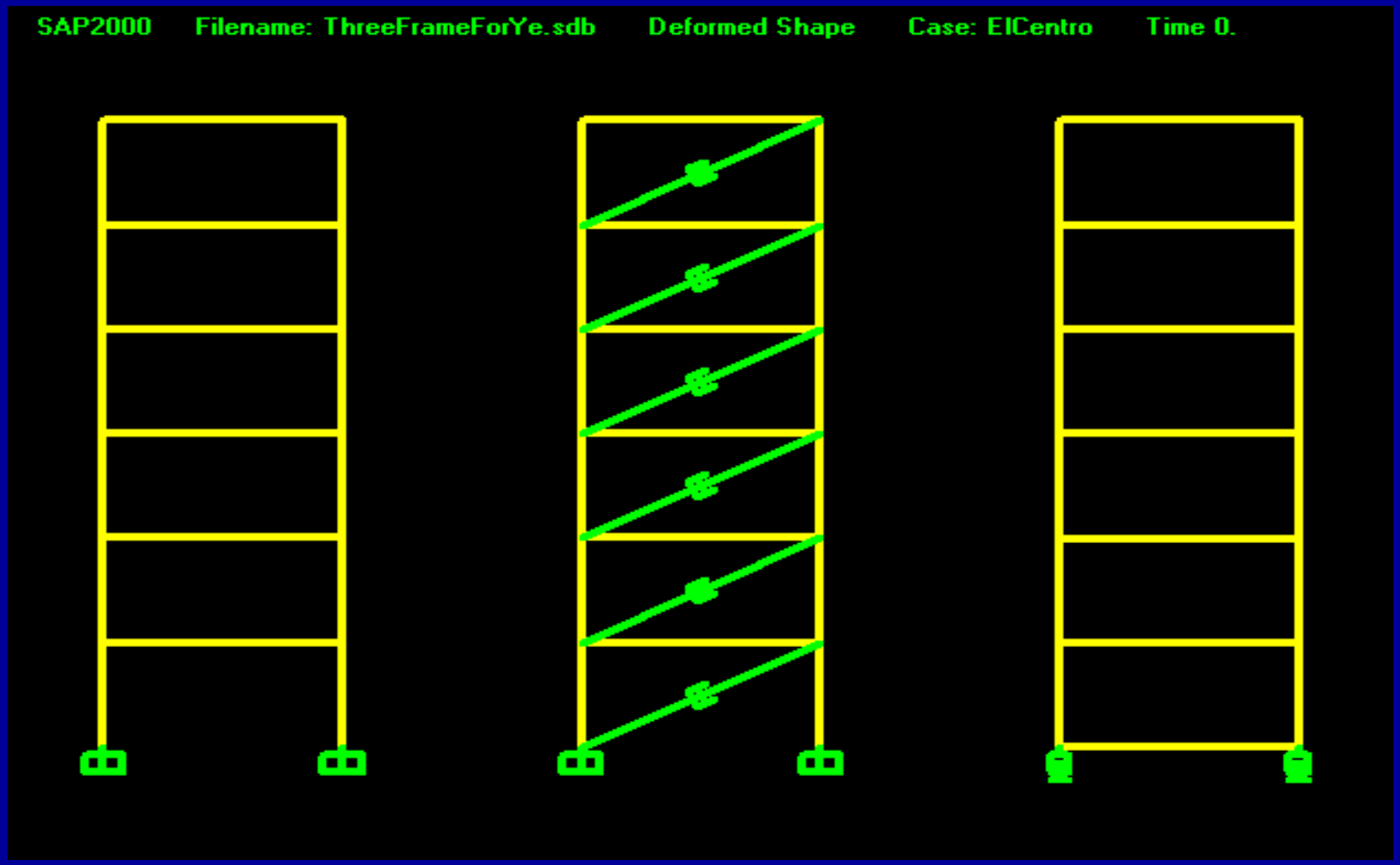
  震动放大系数可 M＜1 （ 0.1-0.4 ）

  目标:减低结构加速度(地震力)反应

  既能保护结构安全,也能保护内部设施



隔震减震新技术方法对比



抗震、隔震和消能减震技术的对比和应用

	抗震	消能减震	隔震
原理	加大断面,配筋 硬抗地震	增大阻尼 耗能减震	延长结构自振周期 隔离地震
地震放大系数	>2	>1	0.1～0.4
减震效果	100%	80～60%	10～40%
地震结构状态	容许损坏	可有裂缝	保持弹性
保护对象	仅 结构	仅 结构	结构及内部设备仪器
有效情况	一般结构	多高层结构	多低层结构
应用对象	一般建筑 裂而不倒	建筑物 要求 适度提高安全性	建筑物 要求 大大提高安全性 双保护, 保持弹性

7. 隔震在512地震灾后重建中的最新应用

汶川地震重建 建议

（中国工程院 土木建筑学部）

2008.5 北京

推荐三种新技术：

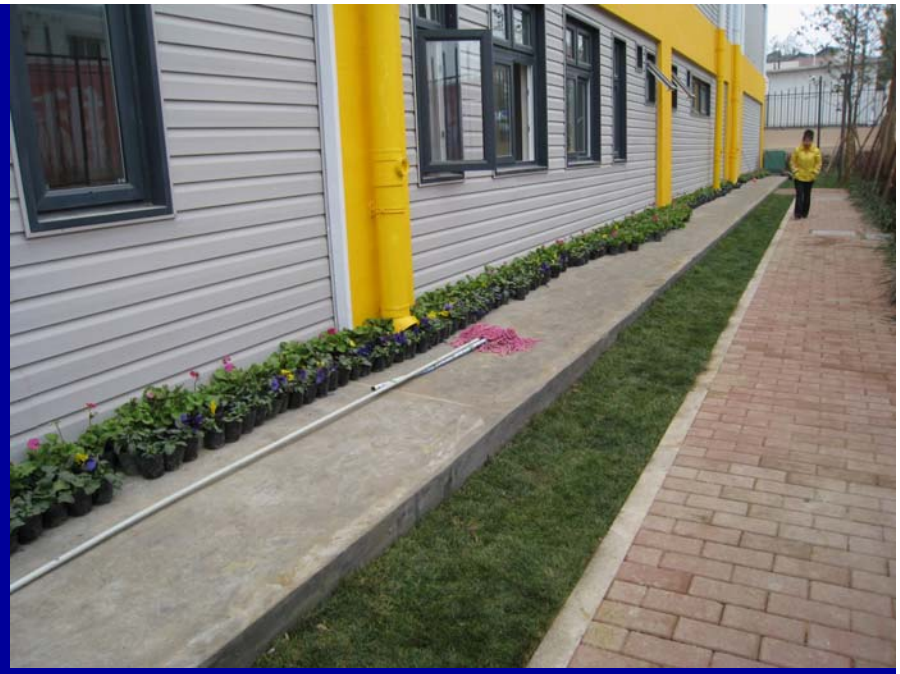
1. 新型遥感影像快速显示技术
2. 房屋隔震技术
3. 房屋建造标准化、工厂化制作技术

灾后首批
隔震房屋 医院,学校
200812.31 建成启用

四川 绵竹 遵道镇
遵道学校 隔震楼
2008.12.31 建成启用

四川 绵竹 遵道镇

遵道学校
隔震楼将成为
大地震避难所



四川 绵竹 遵道镇
遵道卫生院 隔震楼
2008.12.31 建成启用
将成为大地震中
安全的 急救中心

隔震建筑 当前设计配合方式

房屋一般设计：设计院

隔震层设计：广州大学 工程抗震研究中心

1. 隔震层位置方案分析和选定
2. 隔震支座选定和布置
3. 隔震结构分析，计算
4. 隔震构造设计
4. 隔震支座测试
5. 施工安装现场指导和现场配合

已有一批隔震项目正在设计，施工中.

隔震减震技术 的发展趋势和展望

古代千年：抗震结构（一般房屋及工程结构）

隔震结构 (庙宇等---地基灰砂层)

消能减震结构 (1000年应县木塔等--木斗拱)

近代40年： 抗震结构（传统方法及改进）

橡胶隔震减震结构（迅猛发展）

隔震技术 是40年来地震工程最重要成果之一

今后年代： 抗震结构:仍为主流结构，但有时难满足要求

隔震, 减震 (已有规范): 将成为 主流结构之一

The end

Thank you !

谢 谢!

联系方式

周福霖 广州大学 工程抗震研究中心

电话：020-86395053，86395257

手机: 136 0284 2329

传真：020-87337346，86575840

Email: zhoufl@cae.cn

谭 平 广州大学 工程抗震研究中心 副主任

院士学术秘书 博士 研究员

电话： 020-86395007

手机： 133 4288 6639

传真：020-86575840

Email: tanping2000@hotmail.com

单位网址： http://eertc.gzhu.edu.cn