

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0743-05

并联基础隔震体系的隔震层力学特性研究

张富有¹, 常业军², 朱 玲³

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 南京 210098 2. 盐城市土木建筑学会, 江苏盐城 2240052 ;
3. 江苏省南京市机场高速公路管理处, 南京 211100)

摘 要: 并联基础隔震结构是由橡胶隔震支座与摩擦滑移隔震支座并联组合形成的隔震结构, 结构中两种型式的隔震支座相互取长补短, 可以有效地降低隔震结构的造价。由于两种隔震支座竖向刚度的不同, 在地震作用下, 隔震层发生水平位移时, 将引起轴力由橡胶隔震支座向摩擦滑移支座转移, 这种轴力的重新分配对整个系统是有利的, 使系统可以根据水平地震作用的大小来改变系统本身的耗能能力。根据合理的假设, 推导了该种结构隔震支座的轴力随水平位移的变化关系, 得出摩擦滑移隔震支座的力与位移曲线呈蝶形的结论。

关 键 词: 并联基础隔震结构; 摩擦滑移隔震支座; 橡胶隔震支座; 隔震层
中图分类号: TU 352.1 **文献标识码:** A

A study of mechanical properties of seism isolation layer in parallel seism-isolation structure system

ZHANG Fu-you¹, CHANG Ye-jun², ZHU Ling³

(1. College of civil Engineering College of Hohai University, NanJing 210098, China; 2. Yancheng Civil & Architectural Society, Yancheng 224005 China;
3. Nanjing aerodrome freeway Administer department, NanJing 211100, China)

Abstract: The layer of parallel isolation structure is combined with sliding isolated bearings and rubber bearings. With the rubber bearings and the sliding isolation bearings learning from other's strong points to offset their weakness, the parallel isolation structure is an economic system. Because the vertical stiffness of two kinds of bearings in parallel isolation structure is different, their axial forces will shift each other when the displacement of isolation layer increases under earthquake. The transfer is a self-adjustable performance of the system, and this redistribution of axial forces is favorable to the whole system. And can make the system change its energy dissipation capacity. A according to reasonable hypothesis, the axial forces-displacement behavior of the sliding isolated bearings is deduced and the shape of their relation curve is papilionaceous, when the transfer force is considered.

Key words: parallel seism-isolation base; sliding seism-isolation support; rubber seism-isolation support; isolation layer

1 引 言

采用橡胶隔震支座与摩擦滑移隔震支座并联, 组成基础隔震层, 在地震作用下滑移隔震支座通过摩擦耗能来消散地震能量, 达到限制隔震层位移的目的, 橡胶隔震支座提供恢复力, 使隔震结构能在震后回到原来的位置, 两种型式的隔震支座相互取长补短。用滑移隔震支座替代部分橡胶隔震支座, 将减少隔震元件的造价, 在实际工程中有较好的发展和应用前景^[1-3]。

在恒定的竖向荷载作用下, 橡胶隔震支座随水平侧移的增加有效受压面积减小, 竖向压应力增加, 从而竖向变形增大。而摩擦滑移隔震支座竖向变形极小, 可视为没有竖向变形, 如果设隔震层顶部的楼盖为刚性的, 则会在两种支座间产生内力重分布, 这种内力重分布对整个系统而言是有利的。因为橡胶隔震支座在发生水平侧移时, 其有效受压面积减小, 支座正应力将增大, 而侧移所造成的卸载作用将减缓支座正压力增大的趋势, 从一定程度上防止橡胶隔震支座在大位移下的压曲破坏; 相反荷载的转移造成摩擦滑移隔震支座正压力增大, 从

收稿日期: 2006-7-20

基金项目: 河海大学创新基金项目资助 (No.208440301118)。

作者简介: 张富有, 男, 1972 年生, 博士, 主要从事工程抗震与减振的研究。E-mail: fyzhangsy@hhu.edu.cn

而支座的摩擦力增大(如不考虑摩擦系数的变化),这样系统的耗能能力增强,可以较好的限制结构在大震下的位移。分析这种体系的内力重分布对结构动力反应的影响,将有助于指导并联基础隔震结构体系的设计。

2 内力重分布

图 1 为并联隔震结构体系在静止和侧向位移下的示意图。设该体系有一个橡胶隔震支座 A 和一个摩擦滑移隔震支座 B 组成,其中橡胶隔震支座 A 为隔震层所有的橡胶隔震支座之和,即刚度和阻尼为所有橡胶隔震支座的叠加,竖向荷载为所有橡胶隔震支座所受竖向荷载之和;摩擦滑移隔震支座 B 为隔震层所有摩擦滑移隔震支座之和,其竖向荷载为所有滑移隔震支座所受竖向荷载之和,摩擦系数等于单个摩擦滑移隔震支座的摩擦系数。

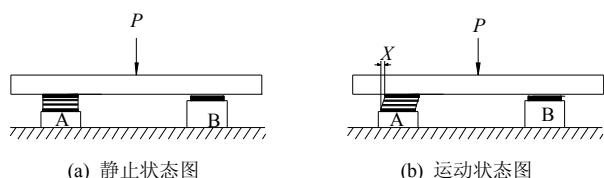


图 1 并联隔震体系示意图

Fig.1 The sketch map of parallel seism-isolation system

为分析图中体系在水平向大位移下的轴力转移过程,作以下假设:

(1) 该体系隔震层顶为刚性楼盖,并在水平位移时无转动。

(2) 对结构在施工完成时上部结构荷载对橡胶隔震支座产生的竖向位移,可看做是支座的不均匀沉降,且附加应力在施工过程中大部分已经释放,故不予考虑。

(3) 橡胶隔震支座和摩擦滑移隔震支座在竖向轴压力方向的力—位移关系符合线弹性假定,其竖向刚度分别为 K_{v1} 和 K_{v2} 。

(4) 不考虑竖向地震作用。

应用 Kelly 等提出的近似方法来计算橡胶隔震支座由于水平向大位移引起的竖向沉降量^[4],由此可得在轴力 P 的作用下橡胶隔震支座在侧向水平位移为 X 时引起的竖向位移 δ_v 为

$$\delta_v = \frac{P X^2}{P_{cr} \sqrt{2} \pi r S_1} \quad (1)$$

式中 r 为橡胶隔震支座半径; P_{cr} 为橡胶隔震支座发生屈曲时的临界力; S_1 为橡胶隔震支座的第

一形状系数;对圆形截面的橡胶隔震支座 S_1 用下式表示:

$$S_1 = D / 4 t_r \quad (2)$$

式中 D 为橡胶隔震支座的直径; t_r 为支座每层橡胶片的厚度。

当并联隔震体系在地震作用下发生水平侧移 X 时,橡胶隔震支座与摩擦滑移隔震支座竖向刚度不同,彼此间将存在竖向相对位移,由此引起两支座间内力重分布,橡胶隔震支座将产生卸载现象,在水平侧移过程中一部分轴力将转移给摩擦滑移隔震支座来承担。

设结构总的竖向荷载为 P ,初始结构静止时由橡胶隔震支座承担的竖向荷载为 P_1 ,由摩擦滑移隔震支座承担的竖向荷载为 P_2 ,则有

$$P = P_1 + P_2 \quad (3)$$

由假设 (1) 知,系统隔震层顶部为刚性楼盖,设在水平侧移过程中转移的轴力大小为 P_X ,则有两支座间的变形协调条件可得以下方程

$$\delta_v - \frac{P_X}{K_{v1}} = \frac{P_X}{K_{v2}} \quad (4)$$

轴力转移后橡胶隔震支座和摩擦滑移隔震支座的轴力变为

$$P'_1 = P_1 - P_X \quad (5)$$

$$P'_2 = P_2 + P_X \quad (6)$$

δ_v 为橡胶隔震支座由于水平位移引起的竖向附加位移,可以用下式表示:

$$\delta_v = \frac{P'_1 X^2}{P_{cr} \sqrt{2} \pi r S_1} \quad (7)$$

由式 (5)、式 (6) 和式 (7) 可得:

$$\frac{(P_1 - P_X) X^2}{P_{cr} \sqrt{2} \pi r S_1} = \frac{P_X}{K_{v2}} + \frac{P_X}{K_{v1}} \quad (8)$$

整理可得:

$$P_X = \frac{K_{v1} K_{v2} X^2}{\sqrt{2} P_{cr} \pi r S_1 (K_{v1} + K_{v2}) + K_{v1} K_{v2} X^2} P_1 \quad (9)$$

对于刚性摩擦滑移隔震支座可取 K_{v2} 为无穷大,则

$$P_X = \frac{X^2}{X^2 + (\sqrt{2} P_{cr} \pi r S_1 / K_{v1})} P_1 \quad (10)$$

把式 (10) 代入式 (5)、式 (6) 可得: 体系隔震

层发生水平位移 X 时, 橡胶隔震支座和摩擦滑移隔震支座的轴力与 X 的关系式为

$$P_1' = [1 - (1 + \frac{\sqrt{2} P_{cr} \pi r S_1}{K_{v1} X^2})^{-1}] P_1 \quad (11)$$

$$P_2' = P_2 + (1 + \frac{\sqrt{2} P_{cr} \pi r S_1}{K_{v1} X^2})^{-1} P_1 \quad (12)$$

3 水平向大位移对屈曲临界力的影响

屈曲临界力可表示为^[4,5]

$$P_{cr} = \sqrt{GA EI} \frac{\pi}{h} \quad (13)$$

式中: G 为橡胶隔震支座的等效剪切模量; E 为等效杨氏模量; I 为支座截面的惯性矩; A 为截面的面积 (内部钢板的面积); h 为橡胶隔震支座高度 (不计两端厚钢板的高度)。

式 (13) 是根据以剪切变形为主的小挠度弯剪梁工程理论经过近似处理后得到的公式。橡胶隔震支座的受力面积为上下表面重合的面积, 在水平向大位移的条件下, 该有效面积减小, 如图 2 所示, 该面积的减小对屈曲临界力的影响较大, 宜对式 (13) 进行修正。设有效承压面积为 A_e , 橡胶隔震支座表面积为 A , 用 α 表示 A_e 与 A 的比值, 则有

$$A_e = \alpha A \quad (14)$$

式中 α 可按式 (5) 进行计算^[5]:

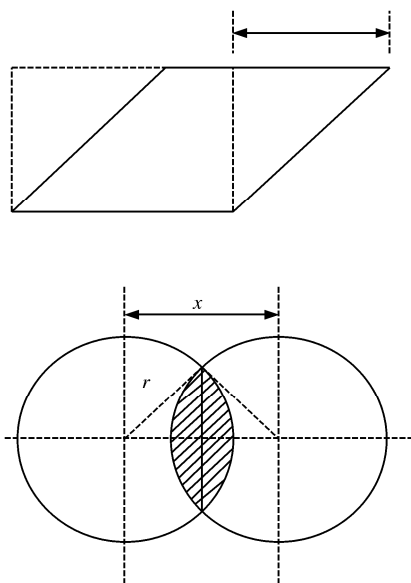


图 2 橡胶隔震支座水平位移图

Fig.2 Horizontal displacement of rubble seism-isolation support support

$$\alpha = \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \left[\frac{X}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{X}{D} \right)^2} + \sin^{-1} \left(\frac{X}{D} \right) \right] \right\} \quad (15)$$

式中 D 为橡胶隔震支座的直径, 对式 (15) 进行线性回归分析可知, 有效承压面积随着水平位移的增加大致成比例的减少, 文献 [4] 中应用级数展开的方式, 忽略高级小量后得到以下两个近似公式:

$$\text{当 } \frac{X}{D} < 0.8 \text{ 时}$$

$$\alpha = 1 - \frac{4}{\pi} \frac{X}{D} + \frac{2}{3} \left(\frac{X}{D} \right)^3 + \frac{1}{10\pi} \left(\frac{X}{D} \right)^5 \quad (16)$$

$$\text{当 } 0.8 \leq \frac{X}{D} < 1 \text{ 时}$$

$$\alpha = \frac{8\sqrt{2}}{3\pi} \left(1 - \frac{X}{D} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (17)$$

建筑抗震设计规范规定^[6], 橡胶隔震支座的最大允许位移在 $0.55D$ 和 3.5 倍的橡胶总厚度间取最小值, 故有 $X/D \leq 0.55D$, 由此式 (17) 可略去不考虑, 将式 (13) 中的 A 用 A_e 代替, 即可得在水平向大位移下临界力的计算公式为

$$P_{cr}' = \sqrt{\alpha GA EI} \frac{\pi}{h} = \sqrt{\alpha} P_{cr} \quad (18)$$

考虑上述大位移对临界力的影响后, 修正式 (10) 可得

$$P_X = \frac{X^2}{X^2 + (\sqrt{2\alpha} P_{cr} \pi r S_1 / K_{v1})} P_1 \quad (19)$$

从而橡胶隔震支座和摩擦滑移隔震支座的轴力与隔震层水平位移 X 的关系式为

$$P_1' = [1 - (1 + \frac{\sqrt{2\alpha} P_{cr} \pi r S_1}{K_{v1} X^2})^{-1}] P_1 \quad (20)$$

$$P_2' = P_2 + (1 + \frac{\sqrt{2\alpha} P_{cr} \pi r S_1}{K_{v1} X^2})^{-1} P_1 \quad (21)$$

3 实例分析

某小区住宅楼采用并联基础隔震结构体系^[7], 隔震层设置在一层底, 共采用隔震支座 54 只, 直径为 400 mm 的橡胶隔震支座 32 只, 摩擦滑移隔震支座 22 只。上部结构总重量为 5 496.96t, 由橡胶隔震支座承担的重量为 3 678.91t, 摩擦滑移隔震支座承担的重量为 1 818.05t。直径为 400mm 的橡胶隔震支座橡胶片厚度为 4 mm, 薄钢板厚度为 2.5 mm, 第一形状系数为 15, 橡胶硬度为 40, 临界力为 9 358 kN。

按水平位移 X 取不同值的情况分别对橡胶隔震支座的竖向位移、橡胶隔震支座的轴力、摩擦滑移隔震支座的轴力以及摩擦滑移隔震支座的摩擦力进行了计算, 结果见图 3~6。其中图 3 为橡胶隔震支座的竖向位移与隔震层水平位移的关系, 从图中可见, 随着水平位移的增大, 橡胶隔震支座的竖向变形增大。

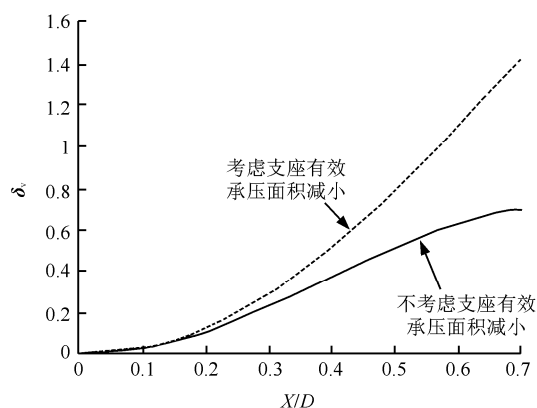


图 3 橡胶支座竖向位移随水平位移的变化

Fig.3 The relation between vertical displacement and horizontal displacement of rubber

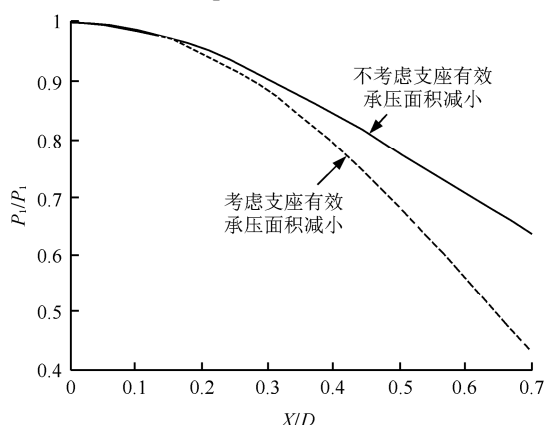


图 4 橡胶隔震支座轴力随水平位移的变化

Fig.4 The relation between axial force and horizontal displacement of seism-isolation support

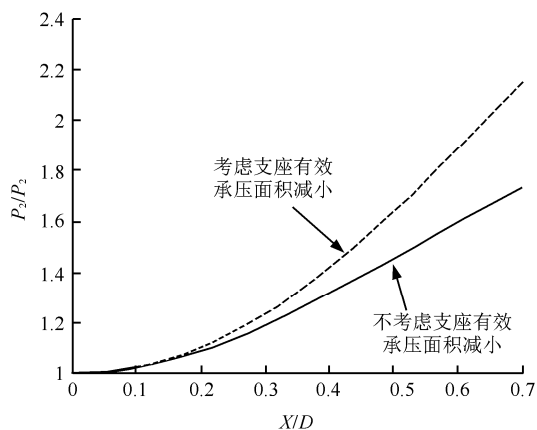


图 5 摩擦支座轴力随水平位移的变化

Fig.5 The relation between axial force and horizontal displacement of sliding

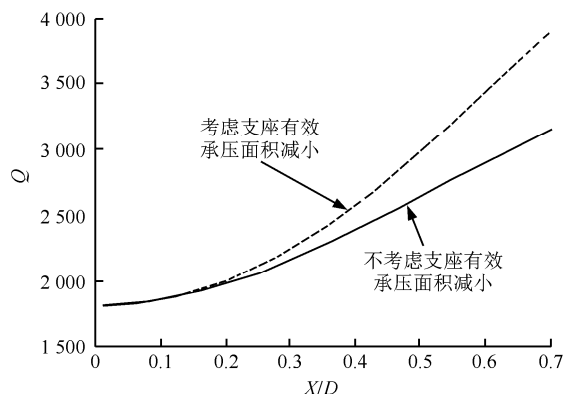


图 6 摩擦力 Q 随水平位移的变化

Fig.6 The relation between friction force and horizontal displacement

在考虑橡胶隔震支座有效承压面积减小时, 竖向变形比不考虑橡胶隔震支座有效承压面积变化时增大的更快。图 4 为橡胶隔震支座轴力与隔震层水平位移之间关系的计算结果, 从图中可见, 随着隔震层水平位移的增加橡胶隔震支座的轴力变小, 考虑橡胶隔震支座有效承压面积减小时, 橡胶隔震支座的轴力减小的更快。图 5 为摩擦滑移隔震支座的轴力随水平位移变化的计算结果, 结果表明, 随着水平位移的增大, 摩擦滑移隔震支座的轴力增大, 在考虑橡胶隔震支座有效承压面积减小时, 轴力比不考虑有效承压面积变化时增大快。如果设摩擦滑移隔震支座的摩擦系数为 μ , 其值在水平位移过程中为常数, 则摩擦滑移隔震支座的摩擦力 $\mu P_2'$ 随着水平位移的增加而增大, 如图 6 中所示, 考虑橡胶支座有效承压面积减小时, 摩擦滑移隔震支座的摩擦力增加的更快。从以上几个图的计算结果可以得出如下结论, 橡胶隔震支座的轴力减小与摩擦滑移隔震支座的轴力增加是对应的, 橡胶隔震支座的轴力减小值等于摩擦滑移隔震支座轴力的增加值。在隔震层发生水平位移的过程中, 由于橡胶隔震支座和摩擦滑移隔震支座之间存在沉降差的趋势, 从而引起橡胶隔震支座的轴力向摩擦滑移隔震支座转移, 摩擦滑移隔震支座轴力的增加引起支座的摩擦力增加, 增加了支座的耗能能力。

如果认为滑动摩擦系数为一常数, 以前认为摩擦滑移隔震支座的竖向荷载不变, 支座的摩擦力 Q 为一常数, 可用下式表示为

$$Q = \mu P_2 \quad (22)$$

其力与水平位移的关系曲线如图 7 虚线所示。

事实上当考虑在水平位移过程中支座竖向荷载变化时, 则摩擦力将不再为一常数, 其值为

$$\dot{Q} = \mu[P_2 + (1 + \frac{\sqrt{2} P_{\alpha} \pi r s}{K_{vl} X^2})^{-1} P_1] \operatorname{sgn}(\dot{X}) \quad (23)$$

式中: sgn 为符号函数; $\dot{X}$ 为隔震层相对基础的速度。由式 (23) 可以看出, 摩擦力与水平位移有关, 随着水平位移的增加, 滑移隔震支座上的竖向荷载增加了 P_x , 故摩擦滑移隔震支座在滑移后水平刚度不再为 0, 摩擦力与位移的关系如图 7 实线所示。当隔震层向相反方向运动时, 由于此时摩擦滑移隔震支座的竖向荷载较大, 所以起滑力较大, 其后随着向相反方向位移的增加, 支座的轴力向橡胶隔震支座发生转移, 摩擦力减小, 直到位移超过初始位置后, 轴力将重新由橡胶隔震支座向摩擦滑移隔震支座转移, 摩擦力也从小变大, 整个过程中, 摩擦滑移隔震支座的力与位移曲线呈现蝶形, 较符合对组合基础隔震房屋模型振动台试验时摩擦支座的滞回曲线^[8-9], 系统的耗能能力明显增加。

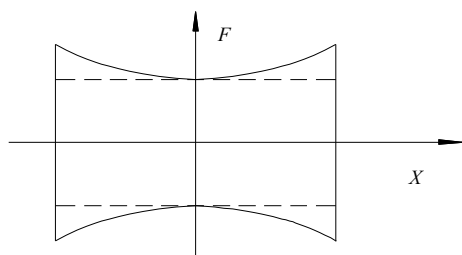


图 7 考虑轴力转移下的摩擦隔震支座水平力与位移的关系曲线图

Fig.7 The curve between horizontal force and displacement of sliding considering axial force transfer

5 结 论

并联基础隔震结构由于两种隔震支座竖向刚度不同, 隔震层发生水平位移时, 将引起轴力由橡胶隔震支座向摩擦滑移支座转移, 这种轴力的重分配对整个系统是有利的, 使系统可以根据水平地震作用的大小来改变系统本身的耗能能力。本文根据合理的假设, 推导了该种结构的隔震支座轴力随水平位移的变化关系, 当考虑轴力转移时, 摩擦滑移隔震支座的水平力与位移曲线呈蝶形, 系统的耗能能力明显增加。地震越强, 内力转移的越多, 摩擦力增加的越大, 因此可以认为, 并联基础隔震结构能够

根据水平地震作用的大小来改变系统本身的耗能能力, 是一种具有自适应保护能力的隔震体系。

参 考 文 献

- [1] James M. Kelly. The Current State of Base Isolation in the United States[A]. **Proceedings of the Second World Conference on Structural Control**[C]. Japan. 1998, 1 043—1 052
- [2] 王亚勇, 李爱群. 现代地震工程进展[M]. 南京: 东南大学出版社. 2002. 57—70.
- [3] 周锡元, 阎维明, 杨润林. 建筑结构的隔震、减振和振动控制[J]. 建筑结构学报. 2002, 23(2): 2—12.
ZHOU Xi-yuan, YAN We-iming, YANG Run-lin. Seismic base isolation, energy dissipation and vibration control of building structure[J]. **Journal of Building Structure**, 2002, 23(2): 2—12.
- [4] 周锡元, 韩淼, 曾德民, 等. 具有软着陆保护的橡胶支座隔震体系[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(5): 2—10.
ZHOU Xi-yuan, HAN Miao, ZENG De-ming, etc. Rubber bearing isolation system with soft landing protection[J]. **Journal of Building Structure**, 2000, 21(5): 2—10.
- [5] 唐家祥, 刘再华. 建筑结构基础隔震[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.
- [6] GB50011-2001, 《建筑抗震设计规范》[S].
GB50011-2001, Code for seismic design of buildings[S].
- [7] 张富有, 基础隔震的可靠度及串、并联隔震的研究, [博士学位论文][D]. 南京: 东南大学, 2003.
- [8] 吕西林, 朱玉华, 施卫星, 等. 组合基础隔震房屋模型振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 42—49.
LÜ Xi-lin, ZHU Xu-hua, SHI Weixing, etc. Shaking table test on building models with combined isolated system[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2001, 34(2): 42—49.
- [9] 朱玉华, 吕西林. 组合基础隔震系统地震反应分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 78—80.
ZHU Yu-hua, LÜ Xi-lin. Analysis of the seismic response of the combined isolating system[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2004, 37(4): 78—80.