

串联基础隔震结构的隔震特性

张富有,魏良甲

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 由橡胶隔震支座与摩擦滑移隔震支座串联成组合支座,再与橡胶隔震支座并联形成的串联基础隔震结构,在地震时可以取得较好的隔震效果.根据串联基础隔震结构的特点,给出了该种隔震体系的等效阻尼、等效刚度的计算公式.将串联隔震支座设定为多个屈服剪力水平,得到了较好的等效阻尼.实例计算表明,选择合适的摩擦系数和 2 种支座的刚度比,可以得到性能较好的隔震结构.

关键词 串联基础隔震结构 橡胶垫 等效阻尼

中图分类号 :TU352.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2007)03-0315-04

采用由橡胶垫和摩擦滑移支座串联组成的隔震支座,在多遇水平地震下,水平刚度较小,在罕遇地震下滑移板产生滑动,其滞回曲线具有明显的弹塑性性质.该支座与橡胶隔震支座组成并联体系,可以取得较好的隔震效果.按照地震的输入水平,对各组串联隔震支座采用不同摩擦系数的材料制作滑移板,可以设定多个屈服剪力水平,也即一部分串联隔震支座先屈服,另一部分串联隔震支座后屈服,隔震层的水平刚度逐级变化,以达到隔震层变刚度的目的,优化隔震效果.

目前对这种串联基础隔震体系的研究较少^[1-6].本文主要讨论串联基础隔震结构的基本特点,并分析基本参数对结构隔震特性的影响.

1 串联基础隔震结构计算模型

1.1 串联基础隔震结构

串联隔震支座是指在橡胶隔震垫上放置摩擦滑移垫所构成的支座.如果结构的隔震层中有一部分隔震支座采用橡胶隔震支座,而另一部分采用串联隔震支座,则将此结构称为串联隔震结构.一般情况下,隔震层上部楼面在水平面内可假设为刚性,隔震层的水平侧移往往要受直径最小的橡胶垫侧移能力的限制.而在结构竖向荷载较小处,如雨篷、裙房处,用较小的橡胶垫即能满足竖向承载力的要求,但在罕遇地震下,直径较小的橡胶垫往往不能满足较大水平侧移的需要,若采用较大直径的橡胶垫又不经济,而采用串联隔震支座能够较好地解决上述问题.

1.2 串联基础隔震结构的计算模型和运动方程

将串联基础隔震结构简化为单质点模型,计算简图如图 1 所示,则其振动微分方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{x}_g \quad (1)$$

式中: M ——集中质量; $\ddot{x}, \dot{x}, x$ ——质点相对于地面的水平加速度、速度、位移; C ——体系阻尼; K ——刚度; $\ddot{x}_g$ ——输入的地面地震水平加速度.

1.3 串联基础隔震体系隔震层水平力与位移的关系

在串联隔震体系的隔震层,橡胶隔震支座的恢复力模型可采用线性模型,斜率为 K_r .若设串联隔震支座的最大静摩擦力为 Q_{sy} ,由串联隔震支座所分担的地震作用产生的剪力为 Q_s ,则当剪力 $Q_s \leq Q_{sy}$ 时,滑移板不产生滑移,其恢复力特性曲线可以用线性模型来描述;当剪力 $Q_s > Q_{sy}$ 时,串联隔震支座滑移板产生滑动,

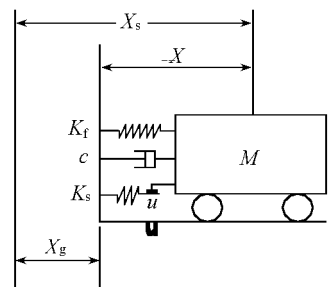


图 1 串联复合隔震计算简图

Fig.1 Calculation diagram of series-base-isolation structure

对库仑干摩擦材料^[7-8],串联隔震支座的水平力和位移关系可以用理想弹塑性模型来描述,支座发生屈服前,其水平刚度为滑板下橡胶隔震垫的抗侧移刚度 K_{sr} ,支座屈服后,支座水平刚度为 0. 串联隔震支座水平力与位移的关系为

$$Q_s = \begin{cases} K_{sr} x_b & (Q_s < Q_{sy}) \\ \mu_s G_s \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) & (Q_s = Q_{sy}) \end{cases} \quad (2)$$

由这 2 种支座组合而成的基础隔震系统,其恢复力模型为理想弹塑性恢复力模型加上线弹性恢复力模型形成的双线性模型.

2 串联基础隔震结构的周期

设串联隔震支座的刚度占隔震层总刚度的比例为 α ,初始隔震层水平刚度为 K_0 ,则摩擦滑板滑动后,隔震层的水平刚度为

$$K_1 = (1 - \alpha) K_0 \quad (3)$$

设隔震结构初始周期为 T_0 ,则 $T_0 = 2\pi \sqrt{M/K_0}$,串联隔震支座在滑动状态时,隔震结构的周期可以表示为

$$T_1 = T_0 / \sqrt{1 - \alpha} \quad (4)$$

与只用橡胶隔震支座的一般情况相比,串联隔震结构的周期可延长 $1/\sqrt{1 - \alpha}$ 倍,合理设置串联隔震支座的刚度占隔震层总刚度的比例为 α ,可以得到周期为 4~5 s 的隔震结构.

3 串联基础隔震结构的阻尼

摩擦阻尼为滞回型阻尼,滞回环丰满,耗能能力很强,完全可以替代铅、软钢等阻尼器^[9-10]. 串联基础隔震结构中摩擦阻尼的大小与材料摩擦系数及串联隔震支座所负担的上部结构重量比例 β 有关^[11],设串联摩擦隔震支座在滑动开始时的屈服位移为 x_y ,层屈服剪力为 Q_y ,隔震层滞回曲线如图 2 所示,则

$$x_y = \mu \beta M g / K_2 \quad (5)$$

$$Q_y = \mu \beta M g (1 + K_1 / K_2) \quad (6)$$

式中: μ ——串联隔震支座的摩擦系数; M ——隔震层以上建筑的总质量; K_2 ——串联隔震支座滑动前水平刚度.

可以看出摩擦系数 μ 确定以后, β 的确定对屈服剪力的大小有较大影响. 可以根据地震的输入水平来设置屈服剪力的大小,在大震发生时,串联滑动支座可发生滑动,从而避免直径较小的橡胶支座发生破坏.

串联基础隔震结构等效阻尼比为

$$\xi_{eq} = \Delta A / (4\pi A) \quad (7)$$

式中: ΔA ——滞回环一周的面积, $\Delta A = 4 Q_y (x - x_y)$; A ——隔震层的弹性应变能, $A = K_e x^2 / 2$; K_e ——隔震层的等效刚度, $K_e = (Q_s + K_1 x) / x$; Q_s ——串联隔震支座的静摩擦力, $Q_s = \mu \beta M g$.

由以上可得串联基础隔震体系隔震层的等效阻尼比为

$$\xi_{eq} = \frac{2}{\pi} \frac{Q_y (x - x_y)}{K_e x^2} \quad (8)$$

结构的等效周期 T_e 为

$$T_e = 2\pi \sqrt{M/K_e} = 2\pi \sqrt{Mx / (K_1 x + Q_s)} \quad (9)$$

由式(8)可以看出,串联基础隔震体系的等效阻尼比与屈服剪力 Q_y 、隔震结构等效水平刚度 K_e 及屈服位移 x_y 等参数有关,是水平位移 x 的函数.

4 隔震性能分析

设串联隔震支座由 2 种摩擦材料组成,屈服位移分别为 10 mm 和 40 mm,按式(8)计算串联隔震支座的等效

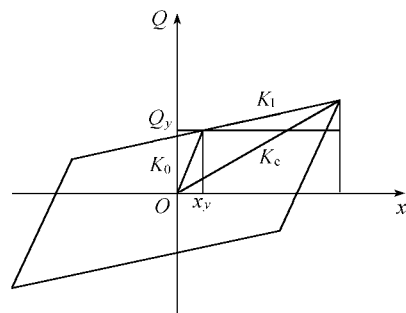


图2 隔震层恢复力曲线

Fig.2 Resilience curve of isolation layer

阻尼比,计算结果如图 3 所示.由图 3 可见,在串联隔震支座滑移屈服前,等效阻尼比为 0,结构不吸收能量,在第一种材料的支座屈服后,随着水平位移的增大,等效阻尼比快速增加,而后等效阻尼比又逐渐减小,随着第二种串联隔震支座的屈服,等效阻尼比又开始增长,然后缓慢下降.2 种类型的串联隔震支座组合,隔震层总的等效阻尼比始终保持在较高的水平上.由此可见,为了保证隔震结构具有较好的耗能作用和小震下的隔震效果,可以根据地震的输入水平,对各组串联隔震支座采用不同摩擦系数的材料制作滑移板,设定多个屈服剪力水平,也即一部分串联隔震支座先屈服,另一部分串联隔震支座后屈服,以达到最优的隔震效果.

为了研究串联隔震结构的性能,本文对串联隔震结构的不同情况进行了计算分析.各种情况具有相同的上部结构参数,为了便于比较,将各种模型都简化为单质点模型.上部结构假设为刚体,刚体质量为 7 690 t,隔震层在串联隔震支座屈服前的总刚度 $K_0 = 33.36 \text{ kN/mm}$,屈服后为橡胶隔震支座的水平刚度^[11].分 2 种工况对不同情况的串联隔震结构进行时程反应分析:

a.橡胶隔震支座和串联隔震支座的水平刚度均不变,只改变摩擦系数使屈服力由小到大增加,橡胶隔震支座的水平刚度总和为 33.36 kN/mm ,串联隔震支座水平刚度总和为 30 kN/mm ,摩擦系数由 0.01 增加到 0.12.

b.系统串联隔震支座的摩擦系数不变,计算时取摩擦系数为 0.1.改变 2 种隔震支座的初始水平刚度比,串联隔震支座的水平刚度与橡胶隔震支座的水平刚度之比 γ 按下式计算:

$$\gamma = \alpha / (1 - \alpha)$$

(10)

按以上情况计算时,地震波采用 EL Centro 波,按 8 度抗震设防标准,输入地震动的最大加速度取 5.10 m/s^2 ,计算结果如图 4~6 所示.

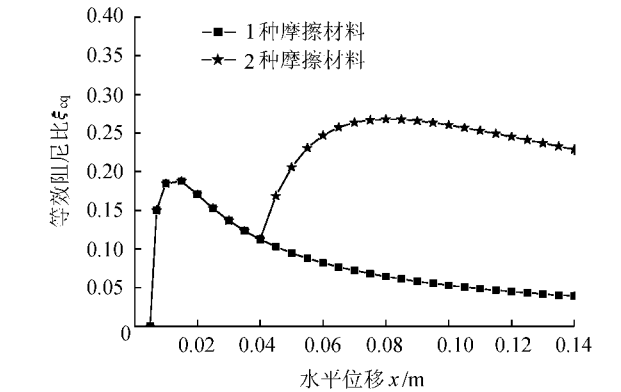


图 3 等效阻尼比 ξ_{eq} 与水平位移 x 的关系

Fig.3 Relation between equivalent damp ξ_{eq} and horizontal displacement x

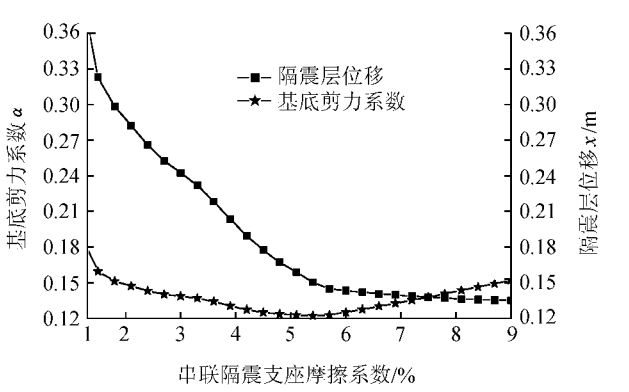


图 4 串联隔震体系位移、剪力系数与 μ 的关系

Fig.4 Relation between displacement, coefficient of shear stress and μ of series-base-isolation structure

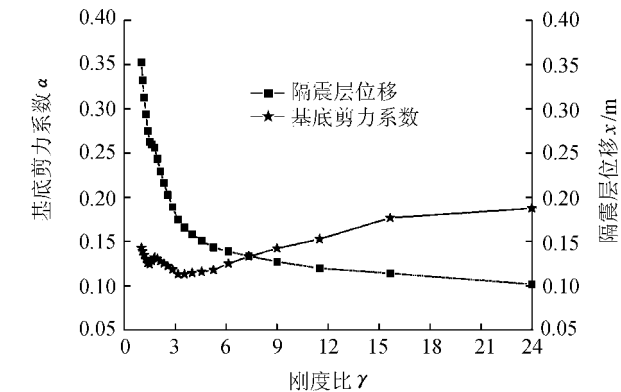


图 5 串联隔震体系位移、剪力系数与 γ 的关系

Fig.5 Relation between displacement, coefficient of shear stress and γ of series-base-isolation structure

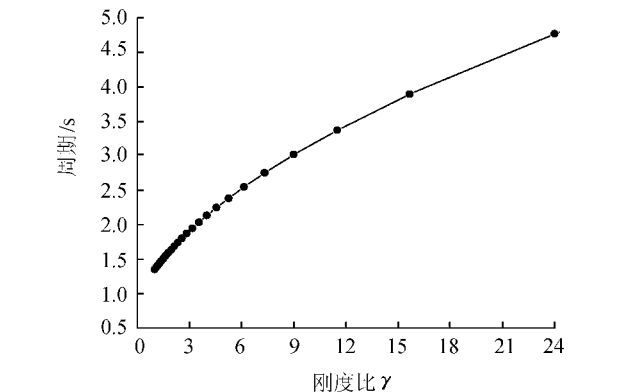


图 6 串联隔震体系周期与 γ 的关系

Fig.6 Relation between period and γ of series-base-isolation structure

由图4可知,随着摩擦系数的增加,隔震层的最大位移反应逐渐减小,初始减小较快,在摩擦系数大于0.06时,位移减小趋势缓慢.隔震层剪力系数曲线则随摩擦系数的增加先减小,后又增大.由此可见,从减小隔震层最大位移的角度来看,增大摩擦系数是有利的,但是在摩擦系数超过某个数值时,隔震层最大剪力系数增大,从而将造成结构上部的反应增大.从图4还可以看出,摩擦系数很小时,系统隔震层位移较大,隔震层剪力系数也较大,小摩擦系数材料的价格也较高.因此摩擦系数并非越小越好,在橡胶隔震支座和串联隔震支座承载比一定的情况下,选择合适的摩擦系数可以得到性能和价格均比较好的隔震结构.

由图5可见,随着串联隔震支座与橡胶隔震支座水平刚度比 γ 的增加,结构隔震层的最大反应位移减小,初始减小趋势很快,然后变缓.隔震层剪力系数基本上具有随着 γ 增加而增大的趋势,取两曲线相交叉处所对应的值为 γ_1 ,则2种隔震支座的水平刚度比 γ 在 γ_1 附近取值时,可得到性能较好的隔震结构.由图6可以看出,隔震层屈服后的自振周期随着水平刚度比 γ 的增大而增加.因此,合理地设计隔震层2种支座的水平刚度比 γ 可以得到隔震周期较长的结构.

5 结 语

本文分析了串联基础隔震结构的特点,给出了该种隔震体系的等效阻尼及等效刚度公式.将串联隔震支座设定多个屈服剪力水平,得到了较好的等效阻尼.实例计算表明,选择合适的摩擦系数和合理的2种支座刚度比,可以得到性能较好的隔震结构.

参考文献:

- [1] 周锡元,阎维明.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.
- [2] 陈以一.世界建筑结构设计精品选:日本篇[M].北京:中国建筑工业出版社,2001:92-102.
- [3] 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):43-49.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] JAMES M K. The current state of base isolation in the United States[C]//Proceedings of the Second World Conference on Structural Control. Kyoto:[s.n.],1998:1043-1052.
- [7] JANGID R S. Optimum frictional elements in sliding isolation systems[J]. Computers and Structures,2000,76(5):651-661.
- [8] ABHIJIT K L. Behavior of equipment mounted over a torsionally coupled structure with sliding support[J]. Engineering Structures,2000,22(1):72-84.
- [9] 王铁英,王艳武,王焕定,等.钢铅组合耗能器力学性能试验研究[J].工程力学,2005,22(2):149-154.
- [10] 王焕定,付伟庆,王铁英,等.多级变刚度滞变耗能的设计思想和可行性实验研究[J].地震工程和工程振动,2001,21(4):154-158.
- [11] 张富有.基础隔震的可靠度及串、并联隔震的研究[D].南京:东南大学,2003.

Characteristics of series-base-isolation structures

ZHANG Fu-you, WEI Liang-jia

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The series-base-isolation structure, with a composite bearing formed by serial connection of the rubber isolation bearing with friction-sliding isolation bearing and connected with the rubber isolation bearing in parallel form, obtains good effect of vibration isolation under earthquakes. According to the characteristics of the series-base-isolation structure, the calculation formulas for the equivalent damp and equivalent stiffness of the structure were given, and the desirable equivalent damp could be obtained by rational design of multi-level yield shear stress of composite bearings. Case study shows that rational determination of the friction coefficient and the stiffness ratio of these two kinds of bearings is helpful to obtain good effect of vibration isolation.

Key words series-base-isolation structure; rubber bearing; equivalent damp