

# 变曲率摩擦摆隔震支座理论分析与数值模拟

邓雪松, 龚 健, 周 云

(广州大学 土木工程学院, 广州 510006)

**摘 要:**介绍了变曲率摩擦摆隔震支座的基本构成,从力学平衡原理出发对变频式摩擦摆隔震支座和锥形摩擦摆隔震支座两类变曲率摩擦摆隔震支座进行理论分析,推导出变曲率摩擦摆隔震支座的刚度,探讨了支座的自回复特性,得出支座最大残余位移的计算公式。采用 ABAQUS 软件对 2 类变曲率摩擦摆隔震支座进行实体单元建模,模拟了低周反复荷载作用下的滞回特性与回复特性,并与(球面)摩擦摆隔震支座进行对比分析。研究表明:1)理论分析和数值模拟结果吻合较好;2)变曲率摩擦摆隔震支座的滞回曲线饱满,具有良好的滞回性能,且与初始刚度相同的(球面)摩擦摆隔震支座相比,其等效粘滞阻尼比和耗能系数更大,具有更强的耗能能力;3)变曲率摩擦摆隔震支座的刚度由曲率半径,即曲面函数决定,经合理设计可使得其刚度随着位移增大呈现逐渐减小的趋势,从而使其自振周期随着位移增大而逐渐增大,可较好的解决隔震结构的低频共振问题;4)与(球面)摩擦摆隔震支座相比,该支座刚度软化的机制可使传递给上部结构的剪力减小;5)该支座的最大应力出现在支座位于设计位移时刻,且一般位于滑块或支座板球铰面边缘;6)该支座的最大残余位移由摩擦系数和曲面函数各参数共同决定,可通过理论分析和数值模拟进行合理的参数化设计将其控制在工程可接受的范围内。

**关键词:**变曲率摩擦摆隔震支座;周期性荷载;滞回;回复能力;摩擦系数;曲率半径

**中图分类号:**TU352.1   **文献标志码:**A   **文章编号:**1674-4764(2011)01-050-09

## Theoretical Analysis and Numerical Simulation of Variable Curvature Friction Pendulum Isolation Bearing

DENG Xue-song, GONG Jian, ZHOU Yun

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, P. R. China)

**Abstract:** The basic structure of Variable Curvature Friction Pendulum Isolation Bearing (VCFP) is introduced. Based on the principle of mechanical equilibrium, theoretical analysis on two types of VCFP which are Variable Frequency Pendulum Isolation Bearing (VFPI) and Conical Friction Pendulum Bearing (CFPI) are conducted. The stiffness of each VCFP is derived, and the recovery characteristics were discussed and the computing formula of maximum residual displacement was deduced as well. Moreover, with the use of ABAQUS software, the models with solid element of each VCFP are built, and the hysteresis property under low cyclic loading and recovery characteristic are simulated. The comparative analysis of VCFP and Friction Pendulum Bearing (FPB) are also conducted. The results show that: 1) the numerical simulation results are identical to the theoretical analysis; 2) according to its plump hysteresis loops, the hysteresis property of VCFP is favorable, further more, its effective viscous damping ratio and coefficient of energy dissipation are higher than FPB, which indicates its greater ability in energy

收稿日期:2010-03-03

基金项目:广东省自然科学基金研究团队项目(8351009101000001)

作者简介:邓雪松(1967-),女,副教授,主要从事结构抗震与减震控制研究,(E-mail)deng2593@163.com。

dissipation; 3) the stiffness of the VCFP is determined by curvature radius, that is, sliding surface function. And its stiffness decreases with the increase of bearing displacement through rational design. And then its isolation period increases as the displacement increases and the low frequency resonance problem of isolated structures can be well solved; 4) compared with FPB, the softening mechanism of stiffness can make the shear force transferred to superstructure decrease; 5) the maximum stress of bearing appears when the bearing reaches its designed displacement, and in general it may situate in the edge of ball joint surface of slider or bearing plate 6) the maximum residual displacement of VCFP depends on both friction coefficient and the parameters of sliding surface function, therefore, parametric design based on analysis or simulation is necessary so as to control the maximum value in an acceptable range in engineering.

**Key words:** variable curvature friction pendulum isolation bearing; cyclic loads; hysteresis; recovery capability; friction coefficient; curvature radius

摩擦摆支座(FPB)最初由 Zayas 提出<sup>[1]</sup>,由于它具有较强的自限位、复位能力等优点,使得摩擦摆隔震技术得到了迅速发展<sup>[2-3]</sup>,但它也不可避免的存在缺陷,传统意义上的球面摩擦摆隔震支座(FPB),一旦球面半径确定,其隔震周期也随之确定,而在近断层常伴有长周期脉冲型地震波,容易与隔震结构发生低频共振。为克服这一缺陷,不少专家或学者将滑动球面换成函数曲面,研发出变曲率摩擦摆隔震支座,它的曲率半径在整个滑动区域并非定值,因此隔震周期会随着位移不断改变,可避免共振现象的发生,可应用于更广泛的激励和结构条件。

2000年,Praneshl 和 Sinha 研发出变频摆隔震支座(VFPI)<sup>[4-6]</sup>,并将其与摩擦摆支座(FPB)和纯摩擦滑移隔震(PF)系统进行了对比研究,验证了它对减轻结构扭转耦合效应和近断层脉冲式地面运动下的结构响应都是非常有效的。藤田聪<sup>[7]</sup>和许文彦<sup>[8]</sup>对 VFPI 支座启动异步对隔震效果的影响进行了研究。蔡崇兴等研发了变曲率摩擦摆隔震器,提出了考虑局部弯矩影响并可直接运用到二维或三维分析的有限元模型<sup>[9]</sup>。吴政彦<sup>[10]</sup>对比研究了锥形摩擦单摆支座(CFPI)和 VFPI 以及 FPB 在远域和近域地震下的反应,并通过振动台试验验证比较了 CFPI 及 VFPI 的动力行为和减震效果,此外,还评估了采用粘滞阻尼与变曲率支座混合使用的隔震效果。卢炼元等对近断层强震下 FPB 和变曲率隔震支座的隔震效果进行了数值研究,探讨了支座高度和等效摩擦系数等最优参数,并进行了试验验证<sup>[11-14]</sup>。Panchal 和 Jangid 分别对变曲率摩擦单摆隔震桥梁、单层和多层隔震建筑以及储存罐等在近断层和远场下地震动的抗震性能进行了分析,并对上部结构参数、隔震起始周期和频率变化因子以及摩擦系数等进行了参数研究<sup>[15-19]</sup>。

目前,变曲率摩擦摆隔震支座研究仍局限于针对特定支座的定性试验研究,对其力学性能的研究尚不深入和全面,特别是不同设计参数对其性能的影响规律和优化以及支座的自回复能力还有待于进一步研究。针对上述情况,以 VFPI 和 CFPI 2 类变曲率摩擦摆隔震支座(VCFP)为例,从力学平衡原理出发,推导 VCFP 的刚度及其隔震结构的自振周期,对支座的回复特性进行探讨,采用 ABAQUS 对 VCFP 进三维实体单元建模,模拟低周反复荷载作用下的滞回特性和回复特性,由理论分析和数值模拟对 VCFP 的滞回耗能性能和自回复能力进行比较研究。

## 1 变曲率摩擦摆隔震支座的构成

VCFP 与 FPB 的最大不同是滑动面并非球面,而是一个函数曲面,如图 1 所示。研究对象是 VFPI 和 CFPI 2 类 VCFP,其中 VFPI 采用 Pranesh 和 Shih<sup>[6]</sup>所建议的曲面函数;CFPI 的滑动面在某一临界位移范围内与 FPB 相同具有固定的曲率半径,然而一旦支座滑动位移量超过此临界位移时,其滑动面即变成一个固定斜率的斜面,隔震周期即变成无限大,亦即不存在共振周期。

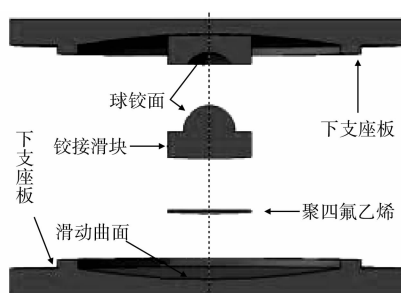


图 1 变曲率摩擦摆隔震支座横截面示意图

### 1.1 变频式摩擦单摆隔震支座(VFPI)

该支座的滑动曲率半径是一个随隔震支座中心位置改变的连续函数,当支座离中心位置越远,其曲率越大而隔震周期随之延长,其中隔震周期  $T_0$  (即支座在中心位置时的周期)为该支座的重要设计因素,其滑动面的曲面函数有椭圆方程转化而来,可表示成<sup>[6]</sup>:

$$y(x) = b \left( 1 - \frac{\sqrt{d^2 + 2d|x|}}{d + |x|} \right) \quad (1)$$

其中,  $b$  为椭圆的短轴长;  $d$  为与椭圆长轴和支座位移相关的一个常数。为便于了解 VFPI 上述 2 个曲面参数几何变化的物理意义,绘制了 VFPI 曲面函数图,如图 2 所示。由图形可知,  $b$  值变小或  $d$  值变大均会使曲面函数变化更平缓。

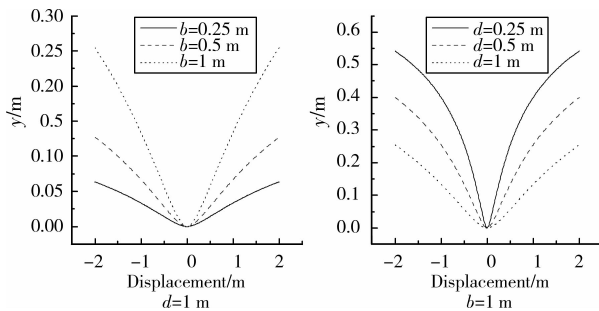


图 2 VFPI 曲面函数

### 1.2 锥形摩擦单摆隔震支座(CFPI)

CFPI 的滑动曲面分为 2 阶段,其滑动面在某一支座位移范围内与 FPB 具有完全相同的曲率半径,可令该临界位移值为  $d_b$ ,一旦隔震支座的滑块在相应滑动曲面的位移量超过  $d_b$  值,则 CFPI 的滑动面即变为相切于  $d_b$  值处的斜面,此时 CFPI 隔震支座滑动曲面的曲率半径  $R$  变为无穷大,回复力即变为一定值,故支座的回复刚度便趋近于零。因此,对 CFPI 而言,  $d_b$  值的设定便成为其重要的设计参数。CFPI 滑动面的曲面函数方程为:

$$y(x) = \begin{cases} R - \sqrt{R^2 - x^2} & |x| \leq d_b \\ c_1 + c_2 (|x| - d_b) & |x| > d_b \end{cases} \quad (2)$$

其中  $R$  为曲率半径,  $c_1$   $c_2$  为 2 个常数,其值为:

$$c_1 = R - \sqrt{R^2 - d_b^2}, c_2 = \frac{d_b}{\sqrt{R^2 - d_b^2}} \quad (3)$$

图 3 所示为不同  $d_b$  值所对应的 CFPI 曲面函数。由图 3 可知,当  $d_b$  值越小,其曲面越平缓,其隔震效果则越趋近于平板滑动隔震支座。当  $d_b$  越大,其曲面越陡峭,其隔震效果越趋近于 FPB。

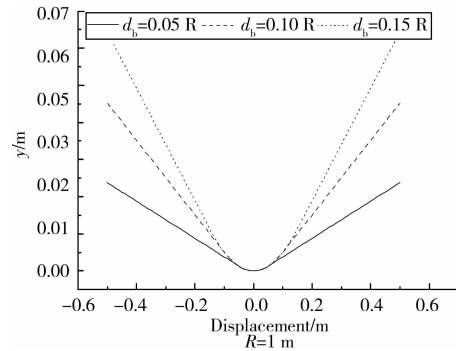


图 3 CFPI 曲面函数

## 2 变曲率摩擦摆隔震支座的理论分析

### 2.1 变曲率摩擦摆隔震支座的刚度和自振周期

在地震作用的过程中,滑块克服摩擦力后会与滑动面产生相对运动,滑块在任意瞬时的平衡力系,如图 4 所示。

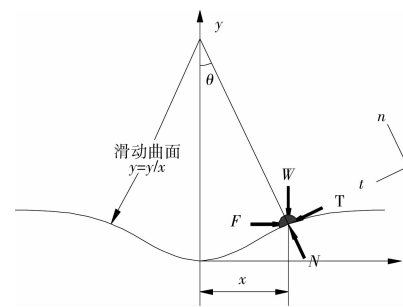


图 4  $F$ - $W$  平面的力系

若不考虑滑块本身具有的质量,则滑块在  $F$ - $W$  平面的平衡方程式可以表示为:

$$\sum F_n = 0; W \cos \theta + F \sin \theta - N = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_t = 0; W \sin \theta - F \cos \theta + T = 0 \quad (5)$$

其中  $W$  为上部结构对滑块所施加的竖向荷载,  $F$  为滑动曲面所承受的水平剪力,  $N$ 、 $T$  分别为滑动曲面与滑块接触面的法向反力和切线方向的摩擦力,  $\theta$  为滑块相对于滑动曲面曲率中心的旋转角。

利用上述 2 式可得:

$$F = W \tan \theta + \frac{T}{\cos \theta} \quad (6)$$

$$N = W (\cos \theta + \tan \theta \sin \theta) + T \tan \theta = W \sec^2 \theta + T \tan \theta \quad (7)$$

公式(6)和(7)中的摩擦力  $T$  与隔震支座处于静止或滑动状态有关。若假设支座处于滑动状态,则可得:

$$T = \text{sgn}(\dot{x}) \mu N = \text{sgn}(\dot{x}) \left[ \frac{\mu W}{\cos \theta \left( 1 - \text{sgn}(\dot{x}) \mu \tan \theta \right)} \right]$$

$$\operatorname{sgn}(\dot{x})\mu W \left( \frac{\sqrt{1+\tan^2\theta}}{1-\operatorname{sgn}(\dot{x})\mu\tan\theta} \right) \quad (8)$$

其中,  $\dot{x}$  为支座的滑动速度。将式(8)带入式(6),整理可得支座在滑动状态下的水平力为:

$$F = W\tan\theta + \operatorname{sgn}(\dot{x})\mu W \left( \frac{1+\tan^2\theta}{1-\operatorname{sgn}(\dot{x})\mu\tan\theta} \right) \quad (9)$$

由公式(6)可将支座的水平剪力分解成 2 部分,视为回复力和摩擦力之和,即:  $F = F_r + F_f$ ,假设变曲率摩擦摆隔震支座的滑动曲面函数为  $y = y(x)$ ,连续且二阶可导,则在滑动曲面上的斜率为:  $y'(x) = \tan\theta$ ,则(9)可改成:

$$F(x) = Wy'(x) + \operatorname{sgn}(\dot{x})\mu W \left( \frac{1+y'^2(x)}{1-\operatorname{sgn}(\dot{x})\mu y'(x)} \right) = F_r(x) + F_f(x) \quad (10)$$

事实上,  $F_f(x)$  是  $x$  的一个函数,对  $F(x)$  有刚度贡献,但当  $y'(x) \leq 1$  和  $\mu \leq 1$ ,可假定:  $F_f(x) \approx \operatorname{sgn}(\dot{x})\mu W$ ,忽略其对刚度的贡献。此时,若以一个非线性弹簧来模拟回复力,即:

$$F_r(x) = k_r(x) \cdot x \quad (11)$$

其中,  $k_r(x)$  为弹簧在位移  $x$  时的“瞬时刚度”。

将式(10)和(11)结合得:  $F_r(x) = k_r(x) \cdot x = Wy'(x)$ ,因  $y(x)$  二阶可导,所以有:

$$k_r(x) = Wy'(x)/x \quad (12)$$

**2.1.1 VFPI** 将式(1)中 VFPI 的曲面函数一次微分后可得曲面的切线斜率:

$$y'(x) = \frac{bd}{(d+|x|)^2 \sqrt{d^2+2d|x|}} x \quad (13)$$

图 5 为 VFPI 曲面斜率分别随  $b$  或  $d$  值不同的对比图。

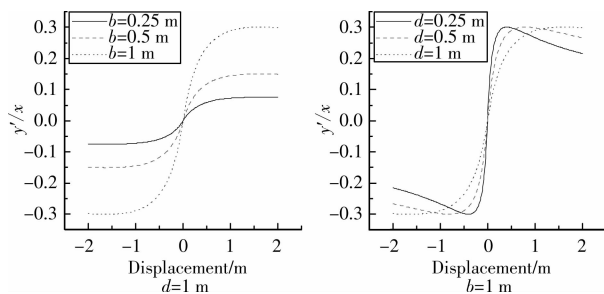


图 5 VFPI 曲面斜率

由图 5 可知, VFPI 的初始刚度由  $b$  和  $d$  共同决定,  $b$  值越大或  $d$  值越小,初始斜率越大,此初始斜率可称之为屈服前的初始刚度。  $b$  变小会造成曲面一次微分的最大值变小,此最大值称之为 VFPI 的屈服强度。

由公式(12)可得式(14)和(15), VFPI 刚度和周

期函数分别如图 6 和图 7 所示。

$$\bar{k}_r(x) = \frac{Wbd}{(d+|x|)^2 \sqrt{d^2+2d|x|}} \quad (14)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{\bar{k}_r(x)}} = 2\pi \sqrt{\frac{(d+|x|)^2 \sqrt{d^2+2d|x|}}{gbd}} \quad (15)$$

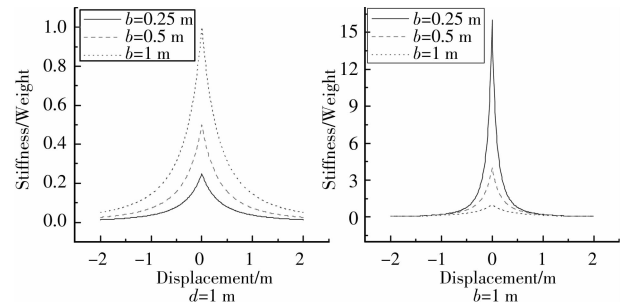


图 6 VFPI 的刚度函数

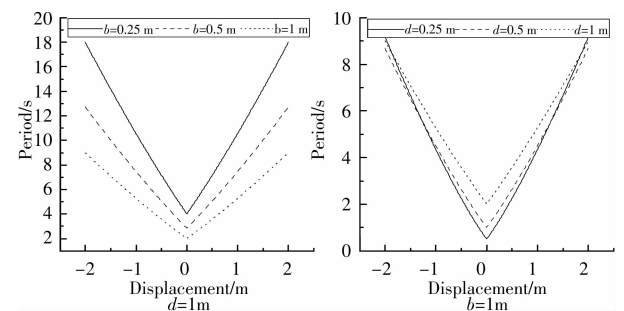


图 7 VFPI 的周期函数

从图 6 可以明显看出, VFPI 的刚度随着位移的增大在不断的软化变小,初期急剧减小,到一定阶段慢慢趋近于 0,这非常有利于减小柱底轴力。从图 7 可知,  $b$  越小,  $d$  越大,初始隔震周期越大,但从数值上相比较而言  $d$  值对隔震周期随着位移变化的影响更为显著。

**2.1.2 CFPI** 将公式(2)中 CFPI 的曲面函数一次微分后可得曲面的切线斜率,即:

$$y'(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sqrt{R^2-x^2}} & |x| \leq d_b \\ c_2 \operatorname{sgn}(x) & |x| > d_b \end{cases} \quad (16)$$

图 8 所示为 CFPI 曲面斜率函数。由图 8 可知,变化  $d_b$  值可改变隔震支座的屈服强度,但并不会改变支座的初始刚度,此点与 VFPI 的  $b$  值具有相同的含义;变化  $R$  值则会影响支座的初始刚度或频率,且达  $d_b$  之后斜率变成一完全水平线,此时由公式(12)可知随着位移增大,刚度逐渐变小。

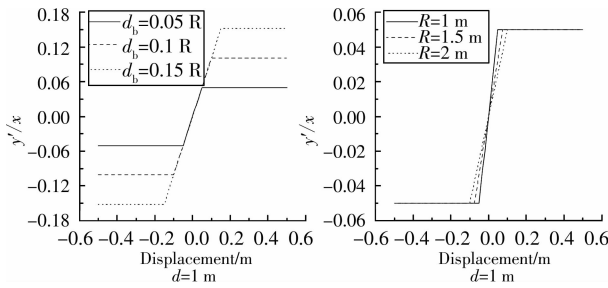


图 8 CFPI 曲面斜率

由公式(12)可得刚度函数和周期函数:

$$\bar{k}_r(x) = \begin{cases} \frac{W}{\sqrt{R^2 - x^2}} & |x| \leq d_b \\ Wc_2 \operatorname{sgn}(x)/x & |x| > d_b \end{cases} \quad (17)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{\bar{k}_r(x)}} = \begin{cases} 2\pi \sqrt{\frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{g}} & |x| \leq d_b \\ 2\pi \sqrt{\frac{x \operatorname{sgn}(x)}{gc_2}} & |x| > d_b \end{cases} \quad (18)$$

图 9 和图 10 分别为刚度和周期函数示意图。从图 9 可清晰看到 CFPI 的初始刚度由  $R$  决定,这与摩擦摆隔震支座(FPB)一样,而位移大于  $d_b$  之后,CFPI 的刚度随着位移的增大而呈反比例函数减小,同样有利于增大隔震周期和减小地震作用。从图 9 和 10 可发现  $d_b/R$  值对位移在  $d_b$  后刚度的减幅速率或隔震周期的增幅速率起决定作用,  $d_b/R$  越小,刚度减小及周期增大越快。

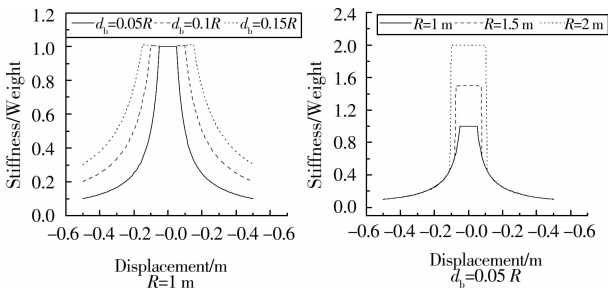


图 9 CFPI 的刚度函数

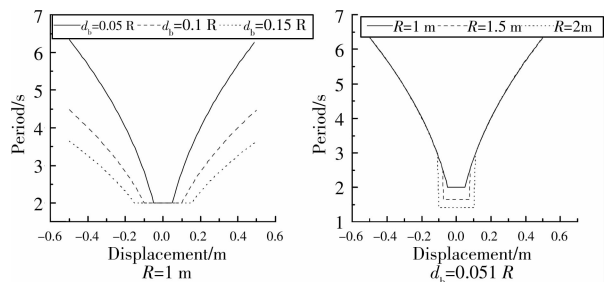


图 10 CFPI 的周期函数

## 2.2 变曲率摩擦摆隔震支座的回复特性

由公式(10)知若支座能自动回复,则满足:

$$F_r(x) \geq F_f(x) \Rightarrow$$

$$W y'(x) \geq \operatorname{sgn}(\dot{x}) \mu W \left( \frac{1 + y'^2(x)}{1 - \operatorname{sgn}(\dot{x}) \mu y'(x)} \right)$$

因此,当曲面函数和摩擦系数一定时,则可求解:

$$y'(x) = \operatorname{sgn}(\dot{x}) \mu \left( \frac{1 + y'^2(x)}{1 - \operatorname{sgn}(\dot{x}) \mu y'(x)} \right) \quad (19)$$

求解所得  $x$ ,即为它可能出现的最大残余位移。

当  $y'(x) \leq 1$  和  $\mu \leq 1$  时,(20)式可简化为:

$$y'(x) = \mu \quad (20)$$

### 2.2.1 VFPI 将式(13)代入式(19)可得:

$$\frac{bd}{(d + |x|)^2 \sqrt{d^2 + 2d|x|}} x = \mu \quad (21)$$

式(21)无法得到精确的解析解,但若给定隔震支座参数却可得到相应的离散解,如:

1)  $b = d = 0.3 \text{ m}$ ,  $D_{\text{设}} = 0.15 \text{ m}$ ,  $\mu = 0.1$ ,则可求得:  $x \approx 0.0454 \text{ m}$ ,即该支座最大残余位移可达 45.4 mm。在此舍去了 0.595 m 这一个解,这是由该曲面函数决定的,由图 5 可知曲面函数的斜率存在一个最大值。如该例中,在  $x \approx 0.17 \text{ m}$  时,式(21)等号左侧达到最大值,而当  $x > 0.595 \text{ m}$  时,式(21)等号左侧恒小于  $\mu = 0.1$ ,也就意味着当位移超过 0.595 m 时,该支座不能回复,当然此处由于  $D_{\text{设}} = 0.15 \text{ m}$ ,不存在此问题。

2)  $b = d = 1.5 \text{ m}$ ,  $D_{\text{设}} = 0.15 \text{ m}$ ,  $\mu = 0.1$ ,则可求得:  $x \approx 0.227 \text{ m} > D_{\text{设}}$ ,即该支座不能自动回复,最大残余位移可达 150 mm;但如果将  $\mu$  改为 0.01 时,其最大残余位移仅为 15.47 mm。

因此,在 VFPI 支座的设计中,曲面函数的各参数、摩擦系数以及设计位移等对该支座的自回复性能都有重要影响。

2.2.2 CFPI 由于 CFPI 隔震支座的球面和斜面的两部分特殊构造,其刚度也划分为 2 阶段,因此,分析其回复能力或最大残余位移值也应分为如下 2 阶段:

1) 当运动位移  $|s| \leq d_b$ ; 有  $y'(x) = \frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}}$

即滑块仍处于球面,最大残余位移同 FPB,  $x = \mu$

$$\sqrt{\frac{R^2}{\mu^2 + 1}} \approx \mu R。$$

2) 当运动位移  $|s| > d_b$ ; 有  $y'(x) = c_2 \operatorname{sgn}(x)$

I: 若  $c_2 > \mu$ , 则  $d_b < x < s$  段无残余位移,最大残余位移在球面段为  $\mu R$ ;

II: 若  $c_2 \leq \mu$ , 则最大残余位移为  $s$ ,无法回复。

因此,在 CFPI 的设计中,为了使支座具备自动回复能力,需满足:  $c_2 > \mu$ 。

### 3 变曲率摩擦摆隔震支座的数值模拟

#### 3.1 ABAQUS 模型的建立

为了考察变曲率摩擦摆隔震支座在低周反复荷载下的滞回特性和在设计位移时的自动回复能力,以及验证理论分析所得出的刚度所构造出的滞回模型及最大残余位移计算公式的正确性,采用 ABAQUS 软件对 VFPI 和 CFPI 2 类 VCFP 进行数值模拟研究,为了便于比较,增加一个 FPB 的模拟,选择合适参数使三者的初始刚度或频率一致,设计位移均为 150 mm,各个隔震支座曲面参数如表 1 所示,模型示意如图 11 和图 12 所示。

表 1 (变曲率)摩擦摆隔震支座模型曲面参数

支座类型 (曲面函数)	FPB	VFPI	CFPI		
曲面函数 各参数	$R/m$	$b/m$	$D/m$	$R/m$	$d_b/m$
	1.5	1.5	1.5	1.5	0.05
摩擦系数 $\mu$	0.1				

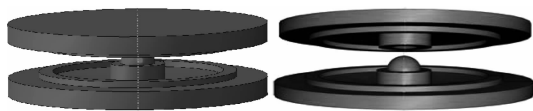


图 11 变曲率摩擦摆隔震支座模型示意图

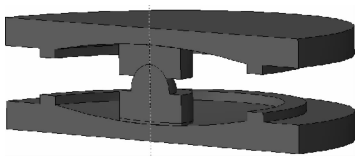


图 12 变曲率摩擦摆隔震支座模型剖面图

由于滑动摩擦是变曲率摩擦摆隔震支座考察的重点,且宜将支座控制在弹性受力状态,故钢材和摩擦材料聚四氟乙烯 (PTFE) 的本构模型均只采用各向同性弹性模型,钢材的弹性模量取  $E=2.1 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\nu=0.3$ ;聚四氟乙烯的弹性模量取  $E=280$  MPa,泊松比  $\nu=0.42$ ,设计强度为  $30 \text{ N/mm}^2$  (试验测得实际极限强度约为 200 MPa)<sup>[20]</sup>。鉴于支座函数曲面复杂和摩擦系数大引起的网格不易划分及分析难收敛等问题,整个模型采用 4 节点线性四面体单元 (C3D4)<sup>[21]</sup>,网格划分如图 13 所示,该单元的可靠性和精度已通过 8 节点六面体线性减缩积分单元 (C3D8R) 对比验证。

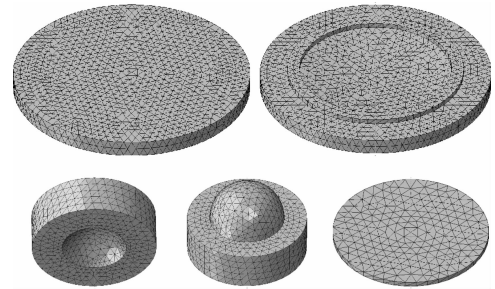


图 13 采用 C3D4 单元网格划分示意图

铰接滑块的聚四氟乙烯滑动面和支座板不锈钢滑动面设有接触对,接触对由主面 (master surface) 和从面 (slave surface) 构成,选不锈钢滑动面为主面,聚四氟乙烯滑动面为从面,从面的网格比主面的网格密。接触属性中的接触面法向作用采用“硬接触” (hard contact); 假设接触面的切向摩擦力遵循库仑定律,即摩擦系数为一常数;且静摩擦系数与动摩擦系数相同,在此设为  $\mu=0.1$ 。该模型中的一个关键是关节式滑块和上支座板 (非滑动面) 的球铰设置,要求使得 2 个球铰面可以绕球铰球心相对旋转 (二者球心一致),选用 join 连接单元进行设置<sup>[21]</sup>。

整个模拟过程共设置 3 个分析步: step1——施加竖向荷载使各接触面发生接触; step2——施加水平简谐位移激励 (保持竖向荷载); step3——水平向到达设计位移时保持竖向荷载考察支座自回复能力。竖向荷载恒定为  $W=500 \text{ kN}$ ; step2 中水平向简谐位移激励为:  $S = A \sin(2\pi ft)$ , 其中  $A$  为振幅,  $A=75 \text{ mm}, 150 \text{ mm}$  (设计位移的 1/2, 1 倍) 各一圈,再加上 150 mm 的 1/4 圈 (即推至设计位移以便进行 step3 的回复分析),  $f=0.5 \text{ Hz}$ , 竖向荷载和水平位移加载历程如图 14 所示。

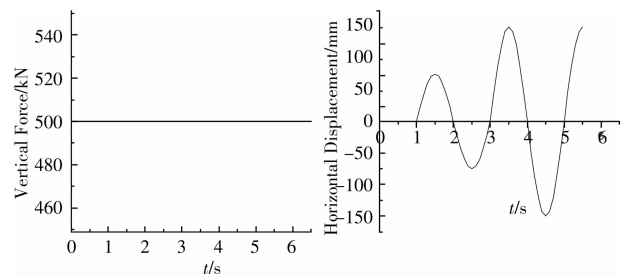


图 14 竖向荷载和水平位移加载历程

#### 3.2 模拟结果分析

3.2.1 滞回特性 可根据公式 (13) 和 (17) 所推导的刚度—位移函数构造出 VFPI 和 CFPI 的滞回模型,绘制其理论分析滞回曲线。图 15 所示为理论分析和 ABAQUS 软件数值模拟得到的支座的滞回曲

线对比图,可以看出滞回曲线对称、稳定、饱满,表现出较好的滞回性能,二者吻合较好,其中起滑及滑动变向段之间产生稍大差异是由于数值模拟输出力一位移的步长稍大(0.1s)而引起,当步长取更小时,二者拟合程度会更好。

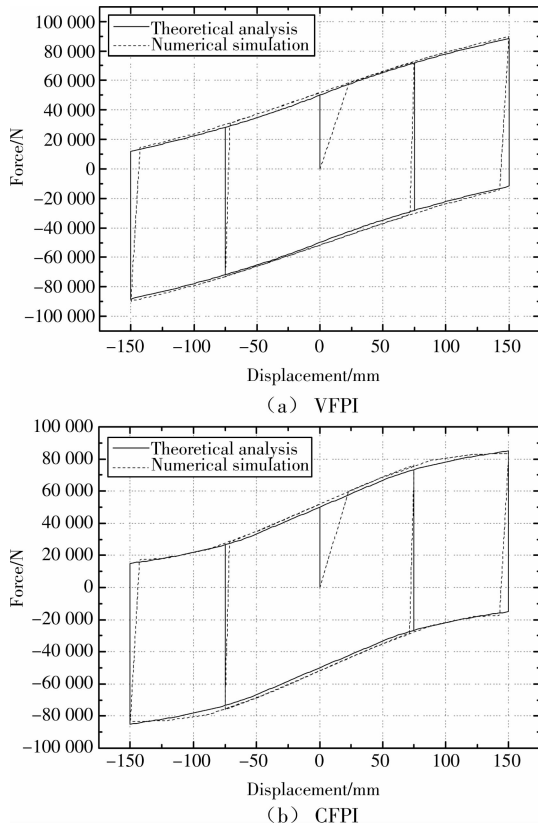


图 15 变速率摩擦摆隔震支座滞回曲线

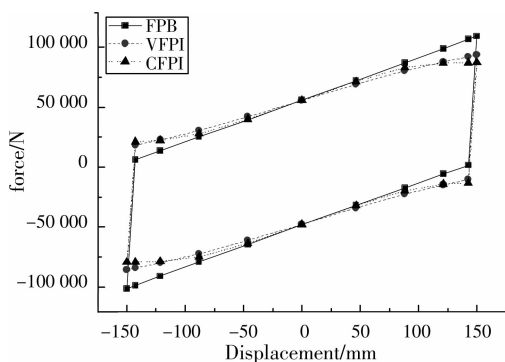


图 16 三个摩擦摆隔震支座模型滞回曲线对比

图 16 中为 VFPI、CFPI 和 FPB 3 个支座模型滞回曲线对比图,可看出,VCFP 的刚度随位移不断软化从而使得支座水平力增加逐渐趋于平缓,此现象不同于 FPB 刚度恒定而导致水平力随位移的增加而不断增大,图中 FPB、VFPI 和 CFPI 在设计位移处的水平力分别为 105 472 N, 89 755.9 N 和 83 398.6 N。该水平力正是隔震支座传递给上部结

构的柱底剪力,因此 VCFP 相对于 FPB 还具有减小传递剪力之优势。

**3.2.2 等效粘滞阻尼比和耗能系数** 等效粘滞阻尼比是考察抗震、减震结构抗震性能的一个重要物理量,是对非线性结构进行等效线性计算时反映构件或结构耗能能力大小的一个关键参数,可与等效刚度配套使用,在利用反应谱法计算结构地震作用时也要引用<sup>[22]</sup>。确定等效粘滞阻尼比的原则是基于能量耗散相等原则,即在一个振动循环内让等效线性体系的耗能等于非弹性体系的滞回耗能,于是等效粘滞阻尼比可表示为:

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} \quad (21)$$

其中,  $E_D$  为非线性体系所耗散的能量;  $E_S$  为等效线性体系的应变能。

根据图 16,按照式(21)可分别求得以上各摩擦摆隔震支座的等效粘滞阻尼比为:  $\xi_{eq}(\text{FPB}) = 0.31$ 、 $\xi_{eq}(\text{VFPI}) = 0.36$  和  $\xi_{eq}(\text{CFPI}) = 0.38$ 。

根据中国 JGJ 101-96《建筑抗震试验方法规程》中对低周反复荷载作用下的抗震性能试验的规定,构件的能量耗散能力应以荷载—变形滞回曲线所包围的面积来衡量,其量化指标为耗能系数。耗能系数是指一个振动周期内能量耗散量与振幅最大处所具弹性势能的比值,又称能量耗散系数,或能量耗散比,耗能系数越大,耗能能力越强。根据图 16,按《建筑抗震试验方法规程》公式(5.5.6)求得以上各摩擦摆隔震支座的耗能系数,分别为:  $E_{\text{FPB}} = 1.93$ 、 $E_{\text{VFPI}} = 2.25$  和  $E_{\text{CFPI}} = 2.41$ 。

因此由等效粘滞阻尼比或耗能系数可知,变速率摩擦摆隔震支座比(球面)摩擦摆隔震支座的耗能能力更强。

**3.2.3 应力分析** 支座在工作状态中的应力分布及其变化规律以及最大应力位置可反映支座是否出现薄弱位置以致破坏,关系到隔震支座在地震作用下是否能正常工作以发挥应有的隔减震作用。图 17 为 VFPI 和 CFPI 2 种支座在设计位移处的应力云图(为解决应力集中问题,在此采用先计算应力不变量再对插值结果进行平均计算得到节点应力,且将平均阈值改为 100%)。

经分析可知支座于设计位移处出现的最大应力亦是模型整个分析全局最大应力出现的时刻,由图 17 所示可知,该时刻 VFPI 和 CFPI 的最大应力分别约为 111.9 MPa 和 110.2 MPa,CFPI 略小于 VFPI,这是因为在后期 CFPI 刚度减小的更为迅速。

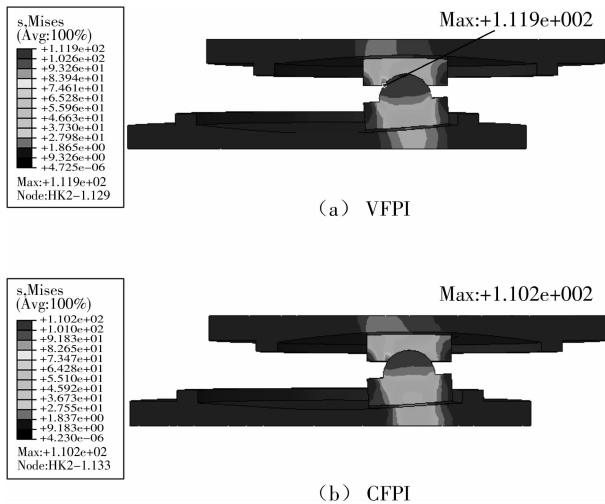


图 17 变曲率摩擦摆隔震支座在设计位移处的应力云图

在整个分析中,2 个支座均处于弹性范围内,且支座的最大应力出现于上支座板的球铰面端口处,这是因为在受到竖向力和水平推力下,球铰面发生挤压,而本例中该处的投影面积最小故应力最大。由于滑块和上支座板球铰面尺寸影响着支座的位移容量以及可能出现的最大应力,设计中应予以重视。以上为滑块未与支座板限位端接触挤压的情况,若二者发生接触并挤压,最大应力则很可能出现在与限位端最先接触的滑块下边缘,这种情况下容易造成该部位应力集中,甚至增加若干倍,因此宜使支座设计位移足够大或采取在限位端增设软弱弹性层等措施以保护支座在地震下不发生破坏。

**3.2.4 回复特性** 对表 2 所示的 4 组变曲率摩擦摆隔震支座模型的自回复能力进行了数值仿真,由前述理论分析可分别计算出各支座到达设计位移 150 mm 后在竖向力作用下自动回复后的残余位移值,在此将理论分析和数值模拟结果以及相差百分比一并示于表 2。数值模拟得出的位移随时间变化的  $D-T$  曲线,如图 18 所示。

表 2 变曲率摩擦摆隔震支座模型最大残余位移值

支座类型(曲面函数)	VFPI		CFPI		
	A	B	C	D	
模型代码					
摩擦系数 $\mu$	0.1	0.01	0.1	0.01	
残余位移/ mm	理论分析	150	15.47	150	15
	数值模拟	146.04	17.53	145.91	15.64
相差百分比/%	2.6	-13.3	2.7	-4.3	

从表 2 可看出,理论分析和数值模拟所得各支座残余位移值相近,验证了所推导的最大残余位移公式。图 18 所示  $D-T$  曲线仅反映最终残余位移大小以及自回复过程中位移随时间的变化规律,并不确切代表图中所示该时间点上的位移值大小。由回

复特性分析可说明变曲率摩擦摆隔震支座并不能完全自复位,且如若支座的设计参数(摩擦系数或曲面函数变量值)选取不合理时,会造成可能的最大残余位移很大,比如本例中摩擦系数为 0.1 时几乎不可自回复,这在工程设计中亟需考虑和注意。从中还可发现:若曲面更为平缓,则刚度减小快,隔震周期增加快且传递给结构的剪力更小,但也更趋近于平面滑移隔震支座,造成可能产生的最大残余位移更大,自回复能力更弱这一不利后果。工程设计中应综合考虑刚度软化机制与自回复机制,使之达到平衡,符合预期的理想工作状态。

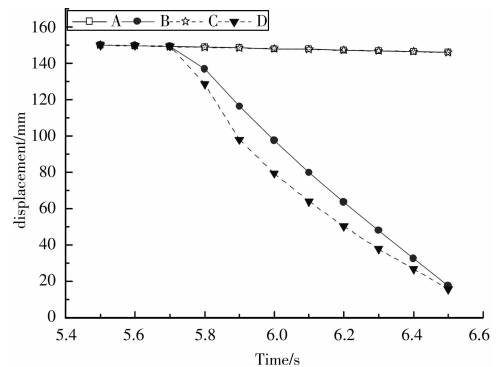


图 18 变曲率摩擦摆隔震支座位移-时间曲线

## 4 结论

对变曲率摩擦摆隔震支座进行了理论分析和数值模拟,可得出以下结论:

1) 理论分析和数值模拟结果吻合较好,验证了理论分析所推导的刚度,以及采用 ABAQUS 有限元分析模拟 VCFP 具有较高精度。

2) VCFP 滞回曲线饱满,具有良好的滞回性能,且与初始刚度相同的 FPB 相比,其等效粘滞阻尼比和耗能系数更大,具有更强的耗能能力。

3) VCFP 的刚度由滑动曲面的曲率半径决定,经合理的设计可使得 VCFP 的刚度随着位移的增大不断减小,自振周期随之增大,能很好的解决隔震结构在遭遇长周期脉冲型地震波激励时易发生低频共振的问题。

4) 相对于 FPB 而言,VCFP 刚度的软化机制可使得传递给上部结构的剪力减小。

5) 支座的全局最大应力出现在支座位于支座设计位移的时刻。当滑块与限位端未发生挤压,最大应力位于支座板和滑块二者投影面积较小的球铰面边缘,若发生挤压,则可能出现于与限位端接触的滑块边缘。

6) VCFP 的自回复能力由摩擦系数和曲面函数各参量决定,倘若设计不合理,其自回复能力会很差。如果曲面更平缓,则其刚度随位移增大的降幅更大,隔震周期增幅更快,传递给上部结构的地震力



更小,但同时也更趋近于平面滑移隔震支座,带来了最大残余位移增大,逐步丧失自回复能力的不利后果,这在工程设计中应予以重视,通过理论分析和数值模拟进行合理的参数化设计将其控制在可接受的范围内。

#### 参考文献:

- [1] ZAYAS V, LOW S, MAHIN S. The FPS earthquake resisting system [R]. University of California at Berkeley, 1987.
- [2] 龚健,周云. 摩擦摆隔震技术研究和应用的回顾与前瞻(I)——摩擦摆隔震支座的类型与性能[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(3).  
GONG JIAN, ZHOU YUN. State of the art and prospect of the research and application of friction pendulum Isolation technology (I)——types and performance of friction pendulum bearings [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(3).
- [3] 周云,龚健. 摩擦摆隔震技术研究和应用的回顾与前瞻(II)——摩擦摆隔震结构的性能分析及摩擦摆隔震技术的应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(4).  
ZHOU YUN, GONG JIAN. State of the art and prospect of the research and application of friction pendulum isolation technology (II)——performance analysis of friction pendulum isolated structures and applications of friction pendulum isolation technologys [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(4).
- [4] PRANESH M, SINHA R. VFPI: An isolation device for aseismic design [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29: 603-627.
- [5] PRANESH MURNAL, RAVI SINHA. Aseismic design of structure equipment systems using variable frequency pendulum isolator [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 231: 129-139.
- [6] PRANESH MURNAL, RAVI SINHA. Behavior of torsionally coupled structures with variable frequency pendulum isolator [J]. J. Structural Engineering, 2004, 130(7): 1041-1054.
- [7] 藤田聡,山本浩道,北川喜浩ら. 複曲率摩擦振り子型免震装置に関する研究開発: 自動販売機モデルを用いた振動実験及び応答解析による免震性能の検討 [C]//日本機械学会論文集, 2003(8):1990-1996.  
FUJITA SATOSHI, YAMAMOTO HIROMICHI, KITAGAWA NOBUHIRO et al. Research and development of the friction pendulum isolation device with poly-curvature: investigation of isolation performance on shake test and response analysis using vending machine model [C]//Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 2003(8):1990-1996.
- [8] 许彦彦. 支承异步运动之滑动隔震结构分析与研究 [D]. 中坩: 国立中央大学, 2004.
- [9] TSAI C, CHIANG T, CHEN B. Finite element formulations and theoretical study for variable curvature friction pendulum system [J]. Engineering Structures, 2003, 25: 1719-1730.
- [10] 吴政彦. 变曲率滑动隔震结构之试验与分析 [D]. 高雄: 国立高雄第一科技大学, 2004.
- [11] LYAN-YWAN LU, JAIN WANG, CHAO-CHUN HSU. Sliding frequency bearings for near-fault ground motions [C]//4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan October 12-13, 2006.
- [12] LYAN-YWAN LU, I-LING YEH, HSUN CHANG. Seismic isolators with variable stiffness (SIVS) for earthquakes with strong long-period components [C]//ASCE-SEI 2009 Structures Congress, Austin, Texas, April 30 - May 2, 2009: 841-849.
- [13] 王建. 变曲率滑动隔震防制近断层震波之实验与分析 [D]. 高雄: 国立高雄第一科技大学, 2006.
- [14] 叶奕麟. 摇摆式隔震支承之理论与实验研究 [D]. 高雄: 国立高雄第一科技大学, 2008.
- [15] V R PANCHAL, R S JANGID. Seismic isolation of bridge using variable curvature friction pendulum system [C]//Proc. of the 14<sup>th</sup> WCEE, Oct., 2-17, 2008, Beijing, China.
- [16] R PANCHAL, R S JANGID. Seismic behavior of variable frequency pendulum isolator [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(2): 193-205.
- [17] V R PANCHAL, R S JANGID. Seismic response of structures with variable friction pendulum system [J]. J. Earthquake Engineering, 2009, 13(2): 193-216.
- [18] V R PANCHAL, R S JANGID. Variable friction pendulum system for seismic isolation of liquid storage tanks [J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238: 1304-1315.
- [19] V R PANCHAL R S, JANGID. Variable friction pendulum system for near-fault ground motions [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2008, 15: 568-584.
- [20] 焦驰宇,胡世德,管仲国. FPS抗震支座分析模型的比较研究 [J]. 振动与冲击, 2007, 26(10).  
JIAO CHI-YU, HU SHI-DE, GUAN ZHONG-GUO. FPS seismic bearing analysis model of the comparative study [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(10).
- [21] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [22] 周云. 粘滞阻尼减震结构设计 [M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2006.