

文章编号: 1004-4574(2008) 04-0044-05

考虑双向非线性橡胶垫隔震层静力性能

李向真¹, 向伟明¹, 徐明贵², 朱小文¹

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006 2. 天津大学 建工学院, 天津 310007)

摘要: 在高阻尼橡胶垫单向双折线非线性假设的基础上, 运用塑性流动法则, 建立了平扭耦联隔震体系隔震层的双向非线性弹塑性本构关系计算模型及其静力计算方法。同时, 通过隔震层模型的计算, 分析了隔震垫非线性及隔震垫不同布置对其静力性能的影响, 供平扭耦联隔震体系双向非线性动力性能的进一步研究参考。

关键词: 平扭耦联; 隔震体系; 双向非线性; 静力性能

中图分类号: P 315 **文献标识码:** A

Static behavior of isolation rubber bearing with consideration of its bidirectional nonlinearity

LIXiang-zhen¹, XIANG Weiming¹, XUMing-gui², ZHUXiao-wen¹

(1. College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

2. College of Civil Engineering and Architecture, Tianjin University, Tianjin 310007, China)

Abstract Based on the assumption of unidirectional bilinearity for high damping rubber bearing and by use of plastic flow law, the bidirectional nonlinear elastoplastic constitutive model of the isolation system with coupled horizontal and torsional motion and its calculation method are established. The influence of the nonlinearity and arrangement of the isolation rubber bearing on the static behavior of the system are analyzed. The results could give a reference to further research on bidirectional nonlinear dynamic behavior of the horizontal-torsional coupled vibration isolation system.

Key words translation-torsion coupling; isolated system; bidirectional non-linear; static behavior

加铅高阻尼橡胶垫具有耗散地震能量、抑制底部位移的作用, 已逐渐在房屋隔振结构中广泛采用。但是, 这种隔震垫的本构关系是非线性的。在平扭耦联隔震体系中, 由于隔震垫处在双向受力状态下, 高阻尼橡胶垫表现出来的本构关系则是双向非线性。基础隔震层的位移相对上部结构是很大的, 而双向强非线性的出现, 将对上部结构的动力效应和基础的移位产生较大影响。因而, 为了研究高阻尼橡胶垫对于平扭耦联隔震体系动力效应的影响, 首先从静力上分析高阻尼橡胶垫的双向非线性本构关系及不同隔震垫布置的影响机理是十分必要的。

1 橡胶垫单向受力状态本构关系

橡胶垫单向受力状态变形曲线包括双折线型、三折线型和曲线型。考虑到双折线型目前在规则隔震结构中应用较普遍, 本文的研究建立在双折线橡胶垫单向受力变形模型的基础上。

收稿日期: 2007-05-13 修订日期: 2008-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50678039)

作者简介: 李向真 (1959-), 男, 副教授, 博士, 主要从事计算结构力学和结构减震控制方面研究. E-mail: lixz880625@163.com

橡胶垫的单向受力本构关系模型如图 1所示。其模型公式为

(1)弹性阶段(卸载阶段)

$$\Delta Q = k_1 \Delta Y \tag{1}$$

(2)弹塑性阶段

$$\Delta Q = k_2 \Delta Y \tag{2}$$

(3)屈服条件

$$(Q - kY_p)^2 - Q_0^2 \geq 0 \tag{3}$$

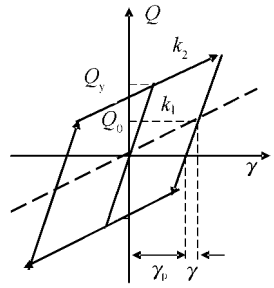


图 1 橡胶垫的单向受力本构关系

Fig 1 Unidirectional forcedisplacement constitutive relationship of rubber bearing

其中 Y_p 为塑性应变。 $k = \frac{k_1 k_2}{k_1 - k_2}$ 。

2 橡胶垫双向受力状态本构关系

(1)弹性阶段(卸载阶段)

$$\begin{Bmatrix} \Delta Q_x \\ \Delta Q_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta Y_x \\ \Delta Y_y \end{Bmatrix}, \text{ 或 } \Delta Q = D \Delta Y \tag{4}$$

(2)弹塑性阶段

$$\Delta Q = D_{ep} \Delta Y \tag{5}$$

其中

$$D_{ep} = D - \frac{D \left\{ \frac{\partial F}{\partial Q} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial Q} \right\}^T D}{\left\{ \frac{\partial F}{\partial Q} \right\}^T (D + kI) \left\{ \frac{\partial F}{\partial Q} \right\}}$$

屈服面

$$F = (Q_x - kY_{px})^2 + (Q_y - kY_{py})^2 - Q_0^2 = 0 \tag{6}$$

由塑性流动法则, 有

$$\Delta Y_p = \Delta \lambda \left\{ \frac{\partial F}{\partial Q} \right\} = B \Delta Y \tag{7}$$

$$B = \frac{\left\{ \frac{\partial F}{\partial Q} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial Q} \right\}^T D}{\left\{ \frac{\partial F}{\partial Q} \right\}^T (kI + D) \left\{ \frac{\partial F}{\partial Q} \right\}} \tag{8}$$

(3)加、卸载条件

加载: $F = (Q_x - kY_{px})^2 + (Q_y - kY_{py})^2 - Q_0^2 > 0$

卸载: $F = (Q_x - kY_{px})^2 + (Q_y - kY_{py})^2 - Q_0^2 < 0$

当 $F = (Q_x - kY_{px})^2 + (Q_y - kY_{py})^2 - Q_0^2 = 0$ 时,

(1) $(Q_x - kY_{px}) \Delta Q_x + (Q_y - kY_{py}) \Delta Q_y > 0$ 加载

(2) $(Q_x - kY_{px}) \Delta Q_x + (Q_y - kY_{py}) \Delta Q_y < 0$ 卸载

(3) $(Q_x - kY_{px}) \Delta Q_x + (Q_y - kY_{py}) \Delta Q_y = 0$ 中性变载。此时 Y_p 不变, 但由于 $\{Q\}$ 有变化, $[D_{ep}]$ 也有变化, 须重新计算。

3 计算方法

设隔震层第 i 个隔震垫刚度矩阵可为

$$D_{ep}^{(i)} = \begin{bmatrix} d_{epkx}^{(i)} & d_{epky}^{(i)} \\ d_{epky}^{(i)} & d_{ep\gamma}^{(i)} \end{bmatrix}$$

对应变量 $v^{(i)} = \{v_x^{(i)}, v_y^{(i)}\}^T$ 。

引入刚性位移变量 $u = \{u_x \quad u_y \quad \theta\}^T$, 则得隔震层的刚度矩阵为

$$K = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{x\theta} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{y\theta} \\ k_{\theta x} & k_{\theta y} & k_{\theta\theta} \end{bmatrix}$$

初始 l 状态:

$$u_b, \Delta u_l, Q_b, \Delta Q_l, u_{pl}, P_l$$

加载 $l+1$ 状态: 已知 P_{l+1} , 求 $u_{l+1}, \Delta u_{l+1}, Q_{l+1}, \Delta Q_{l+1}, v_{pl+1}$ 。

计算步骤:

(1) 由上一级的有关量 $u_l, \Delta u_l, Q_l, \Delta Q_l, u_{pl}$ 计算上一级每一个隔震垫的刚度矩阵 D_{epil} 和隔震层刚度矩阵 K_l ;

(2) 计算隔震层位移增量 $\Delta u_{l+1}, K_l \Delta u_{l+1} = \Delta P_{l+1} (\Delta P_{l+1} = P_{l+1} - P_l)$, 计算本级隔震层位移 $u_{l+1} = u_l + \Delta u_{l+1}$;

(3) 计算隔震垫位移增量 $\Delta v_{l+1}^{(i)} = T^{(i)} \Delta u_{l+1}$, 隔震垫剪力增量 $\Delta Q_{l+1}^{(i)} = D_{epil}^{(i)} \Delta v_{l+1}^{(i)}$, 隔震垫塑性变形增量 $\Delta v_{pl+1}^{(i)} = B_l^{(i)} \Delta v_{l+1}^{(i)}$, 计算本级隔震垫剪力 $Q_{l+1}^{(i)} = Q_l^{(i)} + \Delta Q_{l+1}^{(i)}$, 隔震垫塑性变形 $v_{pl+1}^{(i)} = v_{pl}^{(i)} + \Delta v_{pl+1}^{(i)}$;

(4) 计算塑性功 $W_p = \sum_{l=m_1}^{m_2} P_l^T \Delta u_{l+1}$, m_1, m_2 为进入塑性后的一个循环变载级数。

4 模型算例及分析

4.1 隔震层模型及工况

隔震层模型 (见图 2), 沿 y 向加力, 低周正弦简谐荷载。最大值 200kN。隔震垫两向同性, 基本参数为 $k_1 = 3\ 290\text{kN/cm}, k_2 = 1\ 645\text{kN/cm}, a = 0\ 8356\text{m}$ 。

(1) 屈服剪力工况: $Q_0 = 9\ 87\ 16\ 45\ 20\ 03$ (kN/cm), 对应于屈服位移 $v_y = 3\ 5\ 7$ (cm)。

(2) 偏心距变化布置工况: 6个隔震垫对应位置

1) 不偏心。1, 2, 3, 4, 5, 6

2) 小偏心。1, 7, 3, 4, 8, 6

3) 大偏心。1, 1, 3, 4, 6, 6

(3) 弹力半径变化布置工况: 小偏心, 6个隔震垫对应刚度

1) 内柔外刚。 $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_6 = 1.1, \alpha_7 = \alpha_8 = 0.8$;

2) 均匀。 $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_6 = \alpha_7 = \alpha_8 = 1.0$

3) 内刚外柔。 $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_6 = 0.9, \alpha_7 = \alpha_8 = 1.2$ 。

α 为与该工况下隔震垫刚度与基本刚度之比。

4.2 计算结果和分析

(1) 屈服位移变化。选小偏心, 均匀布置工况。其有关计算结果见表 1 和图 3。

表 1 屈服位移变化的影响

Table 1 Influence of yielding displacement variation

工况	v_{max} /cm	Q_{max} /kN	W_p / (kN·cm)
$v_y = 3\text{cm}$	21.20	39.88	567
$v_y = 5\text{cm}$	18.99	39.63	499
$v_y = 7\text{cm}$	16.83	39.37	435

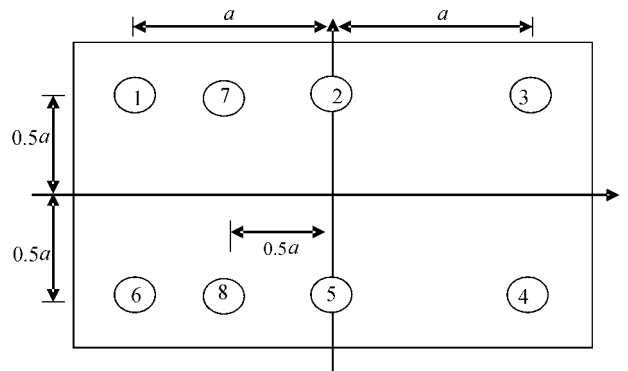


图 2 隔震层模型

Fig 2 Arrangement of rubber bearing

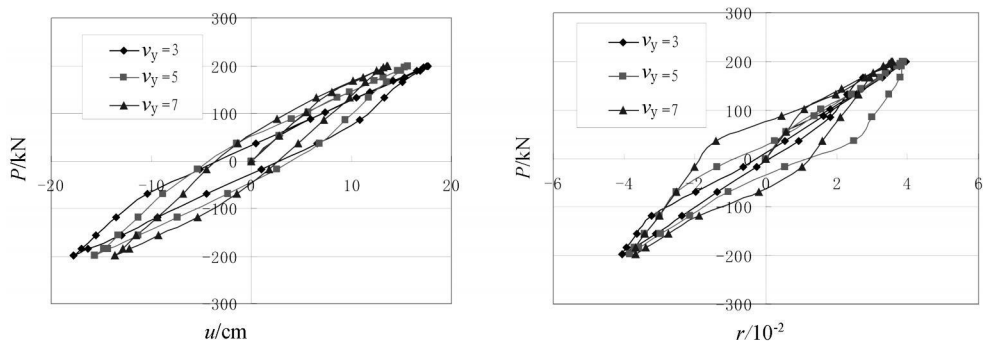


图 3 屈服位移变化时隔震层的位移和转角

Fig 3 Displacement and angular rotation of isolating bearing under yielding displacement variation

从表 1 知, 隔震垫的最大位移 v_{max} 、隔震层的塑性变形功 W_p 均随屈服位移的增大而有所减小。最大剪力 Q_{max} 则随屈服位移的增大变化不大。从图 3 知, 隔震层的位移和转角随屈服位移的增大有所减小。由此可见, 在橡胶垫中加铅具有一定的抑制隔震层位移和转角的作用, 同时可以减少塑性变形的积累。

(2) 偏心距变化

选屈服位移 $v_y = 5$ m, 均匀布置工况。其有关计算结果见表 2 和图 4。

表 2 偏心距变化的影响

Table 2 Influence of eccentricity variation

工况	e_0 /m	ρ_0 /m	v_{max} /cm	Q_{max} /kN	W_{pmax} /(kN·cm)
不偏心	0.00	0.80	15.13	33.33	482
小偏心	-0.14	0.84	18.99	39.63	499
大偏心	-0.28	0.93	22.74	45.85	544

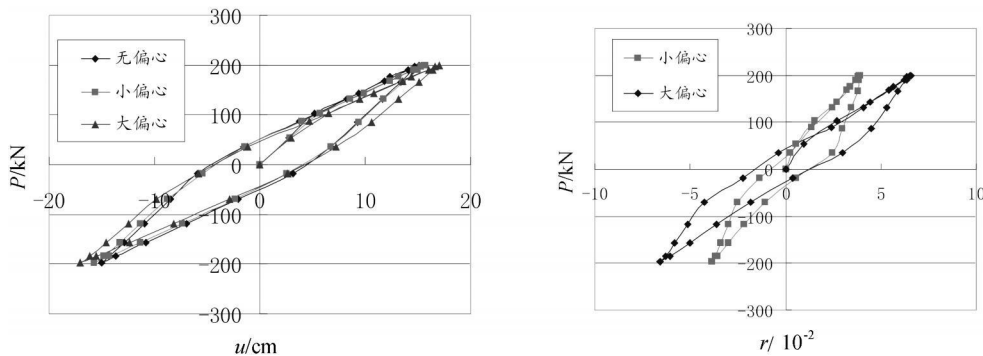


图 4 偏心距变化时隔震层的位移和转角

Fig 4 Displacement and angular rotation of isolating bearing under eccentricity variation

表 2 中的 e_0 、 ρ_0 分别为初始偏心距和初始刚度半径。因为隔震层的偏心距和刚度半径在加载中是变化的, 故取其初始值。从表 2 知, 隔震垫的最大位移 v_{max} 、最大剪力 Q_{max} 、隔震层的塑性变形功 W_p 均随偏心距的增大而有所增大。从图 4 知, 隔震层的位移随偏心距的增大有所增加, 但幅度不大; 而隔震层的转角随偏心距的增大增长较快, 幅度达到 100%。由此可见, 隔震层刚度偏心距越大, 对隔震层则越不利。

(3) 刚度半径变化

选屈服位移 $v_y = 5$ m, 小偏心工况。其有关计算结果见表 3 和图 5。

表 3 刚度半径变化的影响

Table 3 Influence of stiffness radius variation

工况	e_0 /m	ρ_0 /m	v_{max} /cm	Q_{max} /kN	W_{pmax} /(kN·cm)
内柔外刚	-0.11	0.86	17.96	41.74	494
均匀	-0.14	0.84	18.99	39.63	499
内刚外柔	-0.16	0.82	20.98	38.09	540

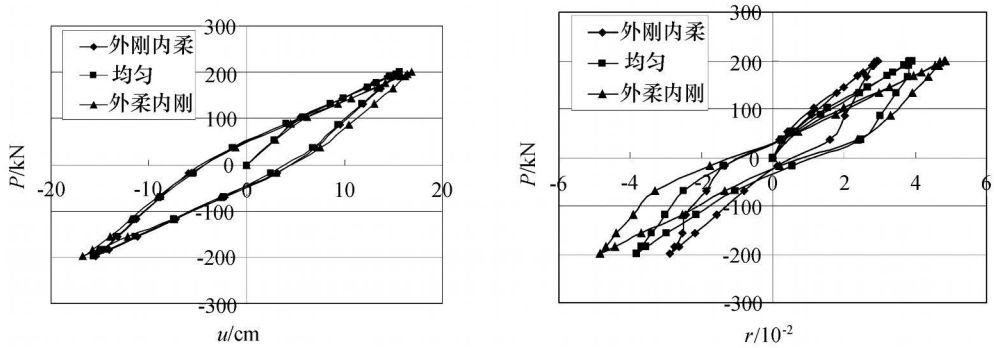


图 5 刚度半径变化时隔震层的位移和转角

Fig 5 Displacement and angular rotation of isolating bearing under stiffness radius variation

由表 3 可见, 隔震垫的最大位移 v_{max} 、隔震层的塑性变形功 W_p 均随刚度半径的减小而有所增大, 最大剪力 Q_{max} 刚度半径的减小而有所减小。由图 5 可见, 隔震层的位移随刚度半径的减小有所增加, 但幅度不大; 而隔震层的转角随刚度半径的减小增长较快, 幅度达到 50% 和 100%。这说明隔震层刚度半径的增加可以大大减低隔震层转角值, 抑制塑性变形, 总体上是有利的。

5 结论

本文在高阻尼橡胶垫单向双折线非线性假设的基础上, 运用塑性流动法则, 建立了平扭耦联隔震体系隔震层的双向非线性弹塑性本构关系计算模型及其静力计算方法。通过隔震层模型的计算分析, 得到以下结论: 在橡胶垫中加铅具有一定的抑制隔震层位移和转角的作用, 同时可以减少塑性变形的积累; 隔震层刚度偏心距越大, 对隔震层则越不利; 隔震层刚度半径的增加可以大大减低隔震层转角值, 抑制塑性变形, 总体上是有利的。

参考文献:

[1] 武田寿一. 建筑物隔震、防振与控制 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997
 [2] 江宜城, 唐家祥, 李媛萍. 多层框架隔震结构的地震扭转反应分析 [J]. 工程抗震, 2000 2: 12- 14