

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210804002

# 考虑支座转角的地基不均匀沉降基础隔震结构 地震响应分析\*

包超<sup>1</sup>, 闫东琦<sup>1</sup>, 张宇航<sup>1</sup>, 吕大海<sup>1</sup>, 马肖彤<sup>2</sup>, 林加胜<sup>3</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 北方民族大学土木工程学院, 宁夏 银川 750021; 3. 马来西亚彭亨大学工程学院, 关丹 26300)

**摘要:** 地基不均匀沉降可能会引起沉降范围内部分隔震支座发生转动, 造成隔震层刚度发生变化, 进而导致上部结构地震损伤和失效风险增大。针对地基不均匀沉降条件下基础隔震结构地震响应研究, 现有成果大都通过施加平动位移进行模拟, 并未考虑隔震支座转角的不利影响。为了研究地基不均匀沉降条件下基础隔震结构支座可能出现的转动及其对整体结构地震响应特征影响规律, 首先以隔震支座为对象, 研究了支座转动变形与叠层橡胶隔震支座水平刚度变化关系, 建立了叠层橡胶隔震支座转角与水平刚度变化关系函数; 在此基础上系统研究了地基不均匀沉降条件下整体基础隔震结构响应特征, 以及基础结构的减震系数变化规律, 以期揭示地基不均匀沉降对基础隔震结构地震响应影响机理。结果表明: 隔震支座转角变形会引起隔震结构体系地震响应发生显著变化, 随着隔震支座转角增大, 隔震层水平刚度增大的同时隔震结构体系变形能力减弱, 进而造成上部结构加速度响应增大, 位移响应减小, 导致基础隔震结构水平减震系数增大, 减震效果低于预期; 当转角接近 $\pi/2$ 时, 隔震支座将丧失降低上部结构地震响应的作用, 原隔震结构将退化为抗震结构; 对于存在地基不均匀沉降的基础隔震结构, 应及时采取必要措施控制地震响应, 以防范上部结构发生倾覆。

**关键词:** 基础隔震结构; 地基不均匀沉降; 叠层橡胶隔震支座; 支座转角; 地震响应

**中图分类号:** TU313.3; TU352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0535-08

## Seismic Response Analysis of Base Isolation Structure Considering Bearing Rotation Caused by Uneven Settlement of Foundation

BAO Chao<sup>1</sup>, YAN Dongqi<sup>1</sup>, ZHANG Yuhang<sup>1</sup>, LYU Dahai<sup>1</sup>, MA Xiaotong<sup>2</sup>, LIM Kar Sing<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. School of Civil Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China;

3. Department of Civil Engineering, College of Engineering, Universiti Malaysia Pahang, Kuantan 26300, Malaysia)

**Abstract:** The uneven settlement of the foundation may cause the rotation of the seismic separation support within the settlement range, resulting in a change in the stiffness of the seismic isolation layer, and thereby increasing the risk of seismic damage and failure of the superstructure. For the study of

\* 收稿日期: 2021-08-04; 修回日期: 2021-08-28

**基金项目:** 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG03022, 2018BEG03009)、宁夏回族自治区重点研发计划项目(引才专项)(2018BEB04006)、宁夏青年科技人才托举工程(TJGC2019001, TJGC2019007)、宁夏高等学校科学技术研究项目优秀青年教师培育基金项目(NGY2020054)、国家自然科学基金项目(51778276)资助

**作者简介:** 包超(1986—), 男, 副教授, 博士。主要从事建筑结构动力灾变行为研究。E-mail: baochao@nxu.edu.cn

**通讯作者:** 闫东琦(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事结构减震控制研究。E-mail: 834193602@qq.com

seismic response of base-isolated structures under the condition of uneven foundation settlement, most of the existing results are simulated by applying translational displacement, and the adverse effects of the rotation angle of the base-isolated support are not considered. To examine the possible rotation of the support of the base-isolated structure under uneven foundation settlement and its influence on the seismic response characteristics of the overall structure, with the seismic isolation support as the object firstly, the relationship between rotation deformation of the support and the horizontal stiffness change of the laminated rubber isolation support is investigated, and the relationship between the rotation angle of the laminated rubber isolation support and the horizontal stiffness change is established. On this basis, the response characteristics of the overall base-isolated structure under uneven foundation settlement and the variation law of the damping coefficient of the base structure are systematically explored to reveal the mechanism of the impact of uneven foundation settlement on the seismic response of the base-isolated structure. The result shows that the angular deformation of the seismic isolation support causes significant changes in the seismic response of the structure. As the rotation angle of the seismic isolation support increases, the horizontal stiffness of the seismic isolation layer increases, while the deformation capacity of the seismic isolation structure system decreases, which in turn causes an increase in acceleration response of the superstructure and a decrease in displacement response. As a result, the horizontal damping coefficient of the base isolation structure increases, and the damping effect is lower than expected. When the rotation angle is close to  $\pi/2$ , the seismic isolation support loses its function of reducing the seismic response of the superstructure, and the original seismic isolation structure degenerates into an earthquake-resistant structure. For base isolation structures with uneven foundation settlement, necessary measures should be taken in time to control the seismic response to prevent the upper structure from overturning.

**Keywords:** base isolation structure; uneven settlement of foundation; rubber isolation bearing; initial rotation angle; seismic response

## 0 引言

隔震结构体系的原理是通过在结构底部和基础间设置柔性层,延长结构的地震周期,有效将地震能量隔离或消耗,减小结构地震反应,保护上部结构的安全<sup>[1-4]</sup>,隔震技术被认为是最有效的抗震手段之一<sup>[5]</sup>。其中,采用橡胶隔震支座是一种比较常用且成熟的方法。何文福等<sup>[6]</sup>研究了厚层橡胶隔震支座的水平和竖向基本力学性能;C.G.Koh等<sup>[7]</sup>为了简化计算提出双自由度力学模型,分析了叠层橡胶支座在大水平位移时的力学性能;林茹等<sup>[8]</sup>对隔震支座进行数值仿真以准确模拟隔震支座力学特性;R.Rahnavard等<sup>[9]</sup>对比分析了单个和多个铅芯橡胶支座的横向稳定性问题;F.Davide等<sup>[10]</sup>针对叠层橡胶支座在大位移条件下的稳定性问题进行分析研究。

湿陷性黄土广泛分布于我国西北高烈度区,处

于该地区的隔震结构需要同时面对潜在强震作用,以及黄土湿陷变形引起隔震支座转动与变形的不利影响。张昭一等<sup>[11]</sup>分析了对于拱型结构支座发生沉降给结构承载力和变形造成影响;王建强等<sup>[12]</sup>采用低周反复循环加载试验方法对铅芯橡胶支座进行了剪切性能试验;陈大川等<sup>[13]</sup>分析地基不均匀沉降的原因及提出合理的加固方案,验证了其有效性和安全性;徐忠根等<sup>[14]</sup>对有初始转角的隔震支座在不同方向地震水平力作用下的力学性能研究。

地基局部不均匀沉降可能会引起部分隔震支座发生转动,以及隔震层刚度发生变化,进而导致上部结构地震失效风险增大。现阶段针对建筑结构地基不均匀沉降多集中于静载条件下的承载力与变形能力;为数不多的地基不均匀沉降基础隔震结构地震响应研究,也仅对支座施加竖向平动位移,并未考虑支座转角的不利影响。对此,针对地基不均匀沉降条件下基础隔震结构支座可能出现

的转动问题,研究建立了叠层橡胶隔震支座转角与水平刚度变化关系函数,并在此基础上研究不同转角条件下基础隔震结构地震响应特征,以及减震系数变化规律,以期揭示地基不均匀沉降对基础隔震结构地震响应影响机理。

## 1 隔震结构体系理论模型

### 1.1 基础隔震结构体系运动方程

基础隔震结构由上部结构和隔震层组成,隔震层通常仅考虑水平变形,而不考虑竖向变形。因此,在计算地震反应时可将隔震层看作隔震结构体系中一个质点,上部结构则看作多质点,基础隔震多质点理论模型如图1所示。

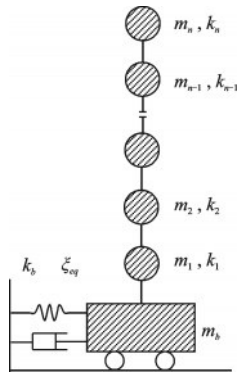


图1 基础隔震多质点模型

Fig.1 Multi-particle model for base isolation

对于叠层橡胶支座,其水平等效刚度和等效黏滞阻尼比分别为:

$$K_b = \sum K_j \quad (1)$$

$$\zeta_{eq} = \sum K_j \zeta_j / k_b \quad (2)$$

式中,  $K_j, \zeta_j$  分别表示第  $j$  隔震支座的水平等效刚度和等效黏滞阻尼比。

上部结构在地震作用下保持弹性,则基础隔震结构的运动方程可写为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -ME\ddot{u}_g \quad (3)$$

式中,  $M, C, K, E, \ddot{u}_g$  分别表示结构的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、外荷载位置向量和地震加速度。对于单向地震作用,  $E = (1, 1, \dots, 1)^T$ ,  $\ddot{u}_g = \ddot{x}_g$ , 其中,  $\ddot{x}_g$  为地震加速度向量。

需要注意的是,隔震层材料与上部结构不同,两者阻尼有明显差异,因此应采用非比例阻尼模型生成阻尼矩阵。

### 1.2 橡胶隔震支座的恢复力模型

等效线性模型是通过将一个线性刚度和阻尼将支座复杂的非线性特性简化而来,如图2所示。通常情况下,叠层橡胶隔震支座、具有非线性特性的高阻尼建筑隔震橡胶支座、各种黏滞型阻尼器、滞变型阻尼器均可以适用该模型。在确定等效线性模型的力学参数时,线刚度  $k$  一般采用割线刚度或切线刚度,单方向的线性恢复力和位移关系为:

$$F = ku \quad (4)$$

式中,  $F$  为隔震支座水平恢复力;  $k$  为水平等效线性刚度;  $u$  为隔震支座水平位移。

具有方向性的弹性恢复力—位移关系为:

$$\begin{cases} F_x = K_x(u_x^b) - e_y^b u_r^b \\ F_y = K_y(u_y^b) - e_x^b u_r^b \\ T = K_r u_r^b + K_y e_x^b u_y^b - K_x e_y^b u_x^b \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $e_x^b = x_k - x_b$ ,  $e_y^b = y_k - y_b$  分别表示结构刚度中心沿  $x$  方向和  $y$  方向相对于隔震层质心的偏心刚度。  $K_x = \sum_{i=1}^n K_{ix}$ ,  $K_y = \sum_{i=1}^n K_{iy}$ ,  $K_r = \sum_{i=1}^n (K_{ix} y_i^2 + K_{iy} x_i^2)$  ( $k_{ix}, k_{iy}, x_i, y_i$  为第  $i$  个隔震支座分别在  $x, y$  方向的剪切刚度及坐标)。

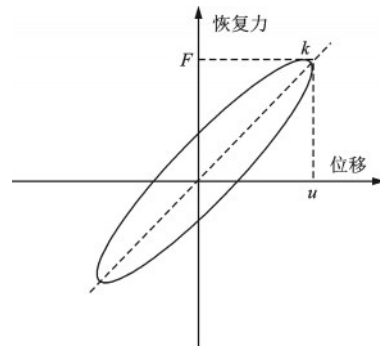


图2 支座线弹性模型滞回曲线

Fig.2 Hysteretic curve of the elastic model for bearing lines

## 2 隔震支座转角与水平刚度关系

隔震支座由橡胶层和薄钢板组成,轴向压力作用下橡胶水平变形受相邻叠层钢板约束,使橡胶实际处于近似三向约束状态,从而承载力将大幅度提高<sup>[15]</sup>。《建筑抗震设计规范》<sup>[16]</sup>规定,隔震层在罕遇地震下应保持稳定,不宜出现不可恢复的变形;隔震支座在罕遇地震的水平 and 竖向地震同时作用下,拉应力不应大于 1 MPa。因此,在研究过程中不考

考虑隔震支座抗拉性能,只考虑隔震支座的抗压性能。

在具有突变性,非连续性和不可逆性的湿陷性黄土环境下,隔震结构的支座在地基发生不均匀沉降或扰动时,将有不规则变形产生,而这种不规则变形对结构性能是否会产生影响及影响程度等尚不甚清楚。如图3所示,将湿陷性黄土沉降形态作为隔震层变形模式。

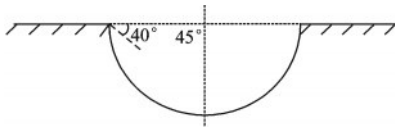


图3 黄土湿陷示意

Fig.3 Illustration of loess collapsibility

现有研究中,大多只考虑隔震支座随地基不均匀产生的竖向位移,并没有考虑在地基不均匀沉降条件下,隔震支座产生的转角对于隔震结构水平刚度影响。实际上,由于部分隔震支座产生不同程度倾斜,如图4所示。在水平地震作用下,地基不均匀沉降基础隔震结构水平运动将不可避免受到一定程度影响。对此,在研究过程中设置如下假设条件:

(1)基于杜永峰等<sup>[17]</sup>地基沉降变形特征中采用的盆式沉降模型,不同沉降区域发生的湿陷角度不同,以此为基础设置转角对于叠层橡胶隔震支座轴向刚度的影响。

(2)在地震动作用下,沉降区域不考虑叠层橡胶隔震支座的受拉能力,仅考虑隔震支座的抗压性能。

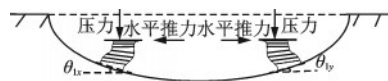


图4 假定条件示意图

Fig.4 Schematic diagram of hypothetical conditions

叠层橡胶支座轴向抗压性能优良,变形主要出现在水平方向上。由假设条件可知,在地基不均匀沉降过程中每个隔震支座所受竖向荷载可看作保持不变;对于沉降区域隔震支座,在竖向荷载与水平荷载的共同作用下,隔震支座将产生大小不同的转角。由叠层橡胶隔震支座构造特点可知,支座转角对其水平刚度具有较大影响,对此,需要首先确定隔震结构支座转角与水平刚度的相互联系。

弹性隔离概念中的许多理论研究和实验工作都是基于J.A.Haringx<sup>[18]</sup>效柱模型。然而,所有研究人员都使用相同边界条件。因此,根据以下边界条

件,从A.K.Ravari等<sup>[19]</sup>端转效应对弹性隔震支座力学性能的影响得到橡胶支座的运动和旋转方程:

$$y(0)=0, \theta_1=0, \theta_2=0, y(h)=y_{\max} \quad (6)$$

式中, $y(0)$ 为底端位移; $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别为橡胶支座底端和顶端的初始旋转角度; $h$ 为橡胶支座的高度。

为对比分析地基不均匀沉降引起的支座转角对水平刚度的影响,只考虑橡胶支座底端产生转角,即 $[y(0)=0, \theta_1=\text{variable}, \theta_2=0]$ ,如图5所示。

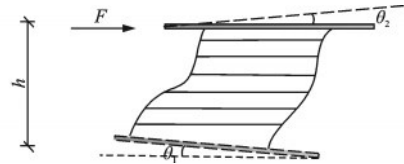


图5 有初始转角橡胶隔震支座

Fig.5 Rubber isolation bearing

根据此边界条件,可得橡胶隔震支座的横向位移和内部转动的变化,并进一步确定到橡胶隔震层水平刚度变化规律。

隔震层是由多个并联隔震支座组成,而单个叠层铅锌橡胶支座的剪切刚度与压缩刚度分别如式(7)和式(8)所示:

$$K_h = \frac{GA}{T_R} \quad (7)$$

$$K_v = \frac{E_{cb}A}{T_R} \quad (8)$$

式中, $E_{cb}$ 为橡胶材料修正后表观弹性模量, $E_{cb} = E_b E_c / (E_c + E_b)$ ;  $E_c$ 为橡胶纯压缩状态的弹性模量, $E_c = 3G(1 + 2\kappa S_1^2)$ ;  $E_b$ 为橡胶材料的体积弹性模量,根据经验可取为1.96 GPa;  $\kappa$ 为橡胶材料的修正系数;  $G$ 、 $A$ 、 $T_R$ 分别为橡胶材料的剪切模量、支座截面面积和橡胶层总厚度。

隔震层水平等效刚度等于 $j$ 个隔震支座的水平等效刚度之和。因此,为了便于确定支座转角对水平刚度影响,以单个铅锌叠层橡胶隔震支座为对象研究研究支座转角与其水平刚度相互联系。根据简化模型可得式(9)所示的隔震支座转角大小与水平刚度变化的关系式:

$$K_\theta = K(1 + \tan \theta) \quad (9)$$

叠层橡胶隔震支座转角与水平刚度变化关系如图6所示。随着隔震支座初始转角的增大,隔震支座的水平刚度呈现快速增大趋势。根据叠层橡胶隔震支座转角的不同,叠层橡胶隔震支座水平刚度变化趋势总体可分为两个阶段:当隔震支座转角较小时,隔震支座的水平刚度增幅有限;当支座转

角接近  $\pi/2$  时,隔震支座水平刚度迅速增长,趋近于无穷大,此时,隔震支座丧失隔震效果,原隔震结构退化为抗震结构。

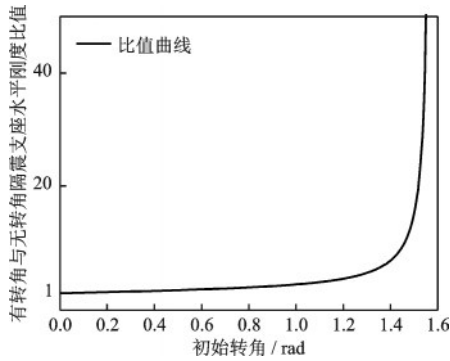


图6 橡胶隔震支座转角与水平刚度变化关系曲线

Fig.6 Relationship between the rotation angle of the rubber isolation bearing and horizontal stiffness

### 3 支座力学性能数值分析

为了研究地基不均匀沉降条件下结构地震响应特征,借助数学软件 MATLAB 进行求解。

#### 3.1 基础隔震结构模型基本参数

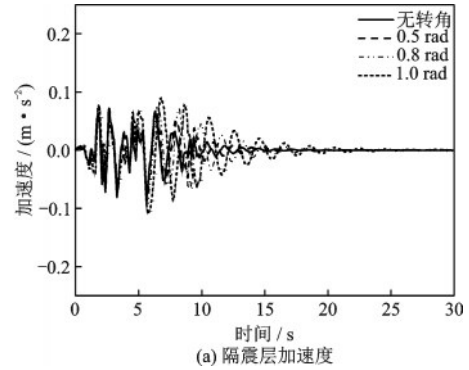
基于 MATLAB 建立基础隔震结构分析函数,主要参数如下:上部结构阻尼比为 0.05,隔震层质量为 7 548.01 kg,隔震层刚度为 419 200 kN/m,隔震层等效阻尼比为 0.15。其中,质量矩阵和刚度矩阵可分别用 Lump Mass 函数和 Stiffness Shear 函数求解。输入的地震波由 Wave1 函数得到,外荷载用 Wave Force 函数得到,阻尼矩阵的生成,用非比例阻尼矩阵函数 Damp Nonclassical 求解。

本文选取经典的 EL-Centro 波、Taft 波,对地震动作用下隔震结构发生地基不均匀沉降时的动力响应合理模拟,并研究隔震结构的抗震性能。

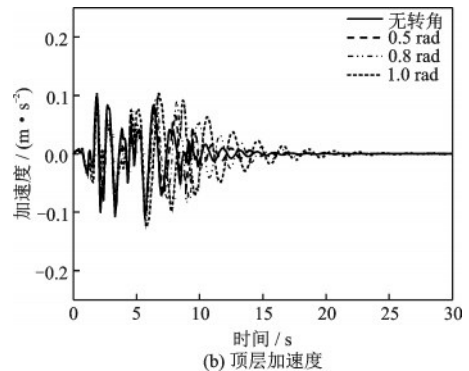
#### 3.2 结果对比分析

对比分析隔震支座发生转角条件下基础隔震结构地震响应特征。基于式(9)所得支座转角与水平刚度之间的变化关系,可得隔震支座在 0.5 rad、0.8 rad、1.0 rad 转角时隔震层刚度  $K_0$  的理论值分别为 648 230.0 kN/m、838 400.0 kN/m、1 072 171.1 kN/m,图 7~8 所示分别为 EL-Centro 波、Taft 波作用下,隔震支座不同转角条件下隔震层和顶层水平加速度时程曲线、位移时程曲线。

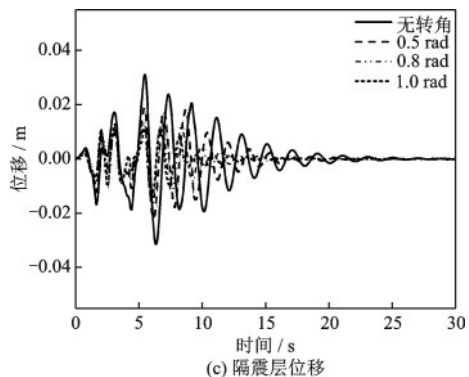
从图 7~8 中 EL-Centro 波、Taft 波地震作用下的加速度时程曲线可以看出,不同转角工况下简化模型的加速度曲线变化趋势大体相同,并且顶层加速度大于隔震层加速度。随着隔震支座初始转角的增大,隔震支座的水平刚度增大,从而减弱了隔



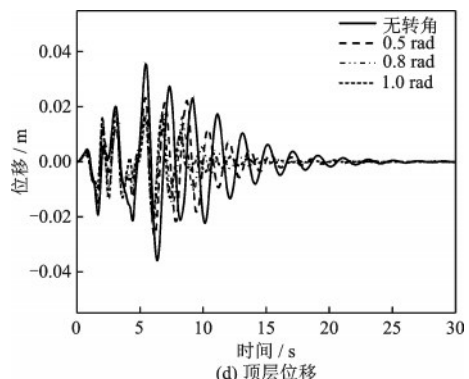
(a) 隔震层加速度



(b) 顶层加速度



(c) 隔震层位移



(d) 顶层位移

图7 EL-Centro 波下结构动力响应

Fig.7 Structural dynamic response under EL-Centro wave

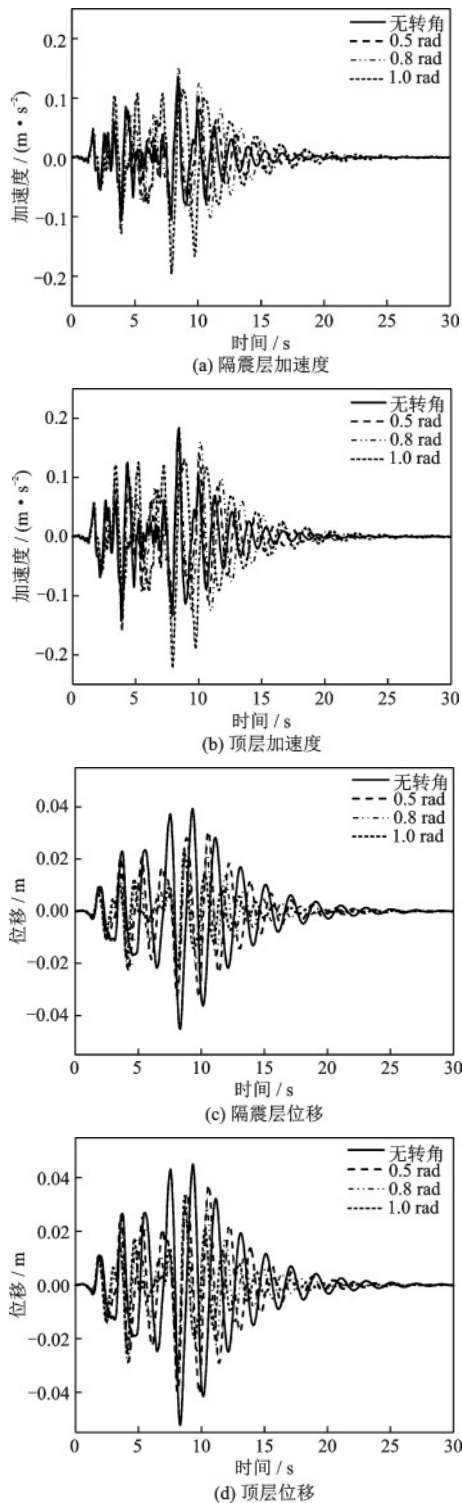


图8 Taft波下结构动力响应

Fig.8 Structural dynamic response under Taft wave

震支座的水平变形能力,进而导致隔震层和顶层的加速度逐渐增大,结构的地震响应显著增大。

由位移时程响应可见,在水平方向地震动作用下,不同转角工况下简化模型的位移变化趋势具有相似性,即随着隔震支座转角逐渐增大,隔震层和

顶层水平位移均显著减小,且提前达到静止平衡状态。但隔震层以上的结构刚度并未发生明显变化,上部结构接近平动。

### 3.3 减震系数变化规律

基于上述结论,利用MATLAB中的状态空间法对有初始转角的隔震支座进行时程分析,研究初始转角对减震系数影响规律。为了保证时程动力分析结果的可靠性,根据《建筑抗震设计规范》<sup>[16]</sup>,以及《建筑工程抗震性态设计通则》<sup>[20]</sup>中有关地震加速度时程选择的建议,对该结构选用ATC-63中六条实际强震记录加速度时程曲线,即Imperial-Valley-06, Northr-STC, Friuli-Italy-01, Cape Mendocion, Northr-SYL, Loma\_Prieta对其进行时程分析研究,地震动参数见表1。

通过对比分析不同加速度时程曲线变化规律,可以隔震支座不同转角条件下结构各层间剪力比。

由《建筑抗震设计规范》<sup>[16]</sup>12.2.5可知,对于多层建筑,按弹性计算所得的隔震结构与非隔震结构各层层间剪力的最大比值即为水平向减震系数;在 $m$ 条地震动作用下,计算隔震结构与非隔震结构的楼层剪力比,楼层剪力比会有相应 $m$ 个最大值,将这 $m$ 个地震动作用下的最大值相加取其平均值,此平均值即为水平方向减震系数 $\beta$ <sup>[21]</sup>,其计算方法如式(10)、式(11)所示:

$$\beta = \frac{\chi_1 + \dots + \chi_m}{m} \quad (10)$$

$$\chi_i = \max_i \left( \frac{V_1}{V'_1}, \frac{V_2}{V'_2}, \dots, \frac{V_{n-1}}{V'_{n-1}}, \frac{V_n}{V'_n} \right) \quad (11)$$

式中, $V$ 为隔震结构的楼层剪力; $V'$ 为非隔震结构的楼层剪力; $m$ 为地震波数量; $n$ 为结构楼层数。

根据上述数据可以求得不同转角情况下的水平减震系数,见表2。

如图9所示,支座转角由0.5 rad增长为0.8 rad时,水平向隔震系数由0.3027增长为0.3661,隔震系数增长率为0.211 rad;在支座转角由0.8 rad增长为1.0 rad时,水平向隔震系数由0.3661增长为0.4249,隔震系数增长率为0.294 rad。由此可见,随着支座转角逐渐增大,水平减震系数的变化率逐渐增大,结构的抗震效果逐级减弱,结构承受地震动作用增强;计算结果符合式(9)所得隔震结构水平刚度和转角的变化规律,这表明隔震层对于建筑地震响应起着主导作用<sup>[22]</sup>。

表1 选自ATC-63中的6条地震动记录

Table 1 Six ground motion records from ATC-63

名称	编号	时间间隔/s	持续时长/s	$PGA_{max}/g$	$PGV_{max}/(cm\cdot s^{-1})$	地震等级
Imperial-Valley-06	NGA_no_165_HCHI012	0.010	39.99	0.28	30.5	6.5
Northr-STC	NGA_no_1048_STC180	0.010	29.98	0.42	53.2	6.7
Friuli-Italy-01	NGA_no_125_ATMZ00	0.005	36.34	0.35	31.0	6.5
Cape_Mendocino	NGA_no_829_RIO270	0.020	35.98	0.55	44.0	7.0
Northr-SYL	NGA_no_1086_SYL090	0.020	39.98	0.73	122.8	6.7
Loma_Prieta	NGA_no_802_STG090	0.005	39.95	0.38	55.6	6.9

表2 不同转角情况下的水平减震系数

Table 2 Horizontal damping coefficient at different rotation angles

支座转角	0.5 rad	0.8 rad	1.0 rad
减震系数	0.302 7	0.366 1	0.424 9

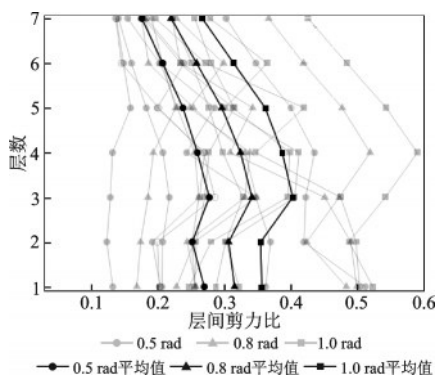


图9 层间剪力比

Fig.9 Inter-story shear strength

随着隔震支座的转角增大,隔震结构与非隔震结构的层间剪力比逐渐增大,致使结构的自振周期减小,结构底部剪力增大,进而导致水平减震系数 $\beta$ 增大,结构的隔震能力逐渐减弱。

## 4 结论

以发生地基不均匀沉降基础隔震结构为研究对象,研究建立支座转角对水平刚度关系函数,并在此基础上系统研究了不同转角条件下基础隔震结构地震响应特征,以及减震系数变化规律。结果表明:

(1) 隔震支座较小时,初始转角对于隔震支座水平刚度的影响有限,结构隔震性能变化不大;当转角接近 $\pi/2$ 时支座水平刚度趋近于无穷大,隔震支座丧失降低上部结构地震响应的作用,原隔震结构退化为抗震结构。

(2) 随着隔震支座初始转角的增大,隔震层水

平刚度增大,隔震结构体系变形能力减弱,结构加速度响应增大,而位移响应显著减小。

(3) 隔震支座转角对隔震结构水平减震系数影响显著;对于存在地基不均匀沉降的基础隔震结构,应采取必要措施控制地震响应,并防范上部结构发生倾覆。

## 参考文献:

- [1] 周颖, 吴浩, 顾安琪. 地震工程: 从抗震、减隔震到可恢复性[J]. 工程力学, 2019, 36(6): 1-12.  
Zhou Y, Wu H, Gu A Q. Engineering mechanics: earthquake engineering: from earthquake resistance, energy dissipation, and isolation, to resilience [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 1-12. (in Chinese)
- [2] 吴应雄, 黄净, 林树枝, 等. 建筑隔震构造设计与应用现状[J]. 土木工程学报, 2018, 51(2): 62-73, 94.  
Wu Y X, Huang J, Lin S Z, et al. Design and application status of seismic isolation constitution of building [J]. Chinese Civil Journal Engineering, 2018, 51(2): 62-73, 94. (in Chinese)
- [3] 金建敏, 肖骥, 刘彦辉, 等. 不同剪切变形下橡胶隔震支座竖向压缩刚度试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(6): 93-99.  
Jin J M, Xiao J, Liu Y H, et al. Experimental study on the vertical compressive stiffness of rubber isolation bearings under different shear deformation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(6): 93-99. (in Chinese)
- [4] 张莉莉, 刘文光, 许浩, 等. 斜向三维隔震支座的非线性力学性能试验及数值模拟研究[J]. 工程力学, 2020, 37(11): 167-175.  
Zhang L L, Liu W G, X H, et al. Experimental and numerical study on the nonlinear mechanical properties of oblique 3d isolation bearings [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(11): 167-175. (in Chinese)
- [5] 田杰, 张志达, 杜志超, 等. 低造价新型橡胶隔震支座力学性能试验研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(3): 33-37, 43.

- Tian J, Zhang Z D, Du Z C, et al. Experimental study on mechanical properties of a new type of low-cost isolation bearing [J]. *Building Science*, 2014, 30 (3) : 33-37,43. (in Chinese)
- [6] 何文福, 刘文光, 杨彦飞, 等. 厚层橡胶隔震支座基本力学性能试验[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 12(3): 258-263.  
He W F, Liu W G, Yang Y F, et al. Basic mechanical properties of thick rubber isolators [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2011, 12(3): 258-263. (in Chinese)
- [7] Koh C G, Kelly J M. A simple mechanical model for electrometric bearings used in base isolation[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1988, 30(12): 933-943.
- [8] 林茹, 刘伟庆, 王曙光, 等. 隔震支座非线性特性的数值模拟[J]. *世界地震工程*, 2014, 30(3): 240-246.  
Lin R, Liu W Q, Wang S G, et al. Numerical simulation of nonlinear characteristics of isolation bearing [J]. *World Earthquake Engineering*, 2014, 30(3): 240-246. (in Chinese)
- [9] Rahnavard R, Craveiro H D, Napolitano R. Static and dynamic stability analysis of a steel-rubber isolator with rubber cores[J]. *Structures*, 2020, 26:441-455.
- [10] Davide F, James M K. Analysis of the large deformation stability of elastomeric bearings[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2014, 140(6): 04014036.
- [11] 张昭一, 王元清, 高阳, 等. 支座沉降对拱壳杂交钢结构设计的影响[J]. *建筑科学与工程*, 2010, 27(4): 103-108.  
Zhang Z Y, Wang Y Q, Gao Y, et al. Effect of support settlement on arch-reticulated shell hybrid steel structure design [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2010, 27(4): 103-108. (in Chinese)
- [12] 王建强, 辛伟, 李政, 等. 铅芯橡胶支座剪切性能的压力相关性试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(5): 200-206.  
Wang J Q, Xin W, Li Z, et al. Experimental study on vertical pressure dependency about shear properties of lead rubber bearing[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 36(5): 200-206. (in Chinese)
- [13] 陈大川, 曹荣伟, 施楚贤, 等. 某底框结构房屋地基不均匀沉降事故原因及加固处理[J]. *建筑结构*, 2015, 45(9): 43-47,34.  
Chen D C, Cao R W, Shi C X, et al. Reason and treatment of an uneven foundation settlement accident of a bottom frame structure house [J]. *Building Structure*, 2015, 45(9): 43-47,34. (in Chinese)
- [14] 徐忠根, 朱祥盛, 邓长根. 有初始转角的隔震支座在不同方向地震水平力作用下的力学性能研究[J]. *建筑科学与工程学报*, 2017, 34(4): 41-47.  
Xu Z G, Zhu X S, Deng C G. Research on mechanical properties of rubber bearings with initial rotation under horizontal seismic forces in different directions [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2017, 34(4): 41-47. (in Chinese)
- [15] 薛彦涛, 常兆中, 高杰. 隔震建筑设计指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Xue Y T, Chang Z Z, Gao J. Guidelines for design of seismic isolation buildings [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [16] 建筑设计抗震规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [17] 杜永峰, 谢丽, 包超. 湿陷性黄土地基不均匀沉降对基础隔震结构的影响分析[J]. *建筑科学*, 2016, 32(7): 34-40.  
Du Y F, Xie L, Bao C. Influence analysis of collapsible loess foundation uneven settlement on the base isolation structure [J]. *Building Science*, 2016, 32(7): 34-40. (in Chinese)
- [18] Haringx J A. Elastic stability of helical springs at a compression larger than original length [J]. *Applied Scientific Research*, 1949, 1(1): 417-434.
- [19] Ravari A K, Othman I, Ibrahim Z, et al.  $P-\Delta$  and end rotation effects on the influence of mechanical properties of elastomeric isolation bearings [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2012, 138(6): 669-675.
- [20] 建筑工程抗震性能化设计通则: CECS160—2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [21] 魏泽. 隔震设计减震系数法与直接设计法的对比分析研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.  
Wei Z. Comparative analysis study on isolated design of damping coefficient method with direct design method [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019. (in Chinese)
- [22] 罗翔, 戴靠山, 吕洋, 等. 软土场地基础隔震建筑减震性能研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(1): 213-222.  
Luo X, Dai K S, Lyu Y, et al. Seismic response reduction of base-isolated buildings located on soft soil sites [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(1): 213-222. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)