

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220123001

考虑SSI效应的基础隔震框架结构抗震性态水平分析*

赵畅¹, 于旭², 庄海洋^{1,3}, 单志承³, 吴晓飞⁴

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 南京工程学院建筑工程学院, 江苏 南京 211167;
3. 南京工业大学交通学院, 江苏 南京 210009; 4. 南京江宁经济技术开发区集团有限公司, 江苏 南京 211167)

摘要: 目前针对于基础隔震结构的性态水平研究往往基于刚性地基假设, 未考虑SSI效应对结构损伤的影响。因此, 为研究柔性地基上小高宽比基础隔震结构的抗震性态水平, 本文以拟建结构为背景, 利用ABAQUS有限元软件建立该小高宽比基础隔震结构建筑物的有限元计算模型, 依据相关规范规定, 选取El-Centro波、Kobe波和卧龙波, 通过改变土体等效剪切波速设计扩展出5种场地, 分析了地震动特性、场地条件以及输入地震动加速度峰值对该结构地震反应的影响规律, 对该结构的损伤程度进行了统计分析。结果表明: 柔性地基上随结构-土体相对刚度比的增大, 基础隔震结构的上部结构损伤和隔震层损伤均增大, 且上部结构的损伤明显滞后于隔震支座损伤, IV场地在同等条件下损伤最严重; 中长周期地震波对于隔震结构损伤影响较大; 选取了层间位移角、隔震层位移作为抗震性态水平的量化指标, 基于计算结果, 本文初步给出了两类指标与结构-土体相对刚度比的预测公式, 提出了不同类别场地下小高宽比基础隔震结构的抗震性态水平划分及其破坏程度的物理描述。

关键词: 柔性地基; 隔震结构; 性态水平; 损伤指数; 量化指标

中图分类号: TU352.1; TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1024-11

Horizontal Analysis of Seismic Behavior of Base Isolated Frame Structure Considering SSI Effect

ZHAO Chang¹, YU Xu², ZHUANG Haiyang^{1,3}, SHAN Zhicheng³, WU Xiaofei⁴

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;

2. Department of Civil Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;

4. Nanjing Jiangning Economic Technology Development General Company, Nanjing 211167, China)

Abstract: At present, research on the behavioral characteristics of base isolation structures often assumes a rigid foundation, neglecting the influence of Soil-Structure Interaction (SSI) on structural damage. Therefore, in order to study the seismic behavior level of small aspect ratio foundation isolation structures on flexible foundations, this paper takes the proposed structure as the background and

* 收稿日期: 2022-01-23; 修回日期: 2022-11-10

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(51778282)资助

作者简介: 赵畅(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事考虑土-结构动力相互作用的隔震结构抗震性能研究。

E-mail: 1012858348@qq.com

通讯作者: 于旭(1977—), 男, 教授, 博士。主要从事考虑土-结构动力相互作用的隔震结构抗震性能研究。

E-mail: yuxurichard@sina.com

uses ABAQUS finite element software to establish a finite element calculation model of the small aspect ratio foundation isolation structure building. We selected El-Centro wave, Kobe wave, and Wolong wave and designed five different site conditions according to relevant specifications. These conditions were created by varying the equivalent shear wave velocity of the soil. The influence of seismic characteristics, site conditions, and input seismic acceleration peak on the seismic response of the structure was analyzed, and the degree of damage to the structure was statistically analyzed. The results demonstrate that as the relative stiffness ratio between the structure and the soil on a flexible foundation increases, damage to the superstructure and isolation layer of base isolation structures also increases. Furthermore, under the same conditions, site IV experiences the most severe damage; Medium to long-period seismic waves have a substantial impact on the damage sustained by isolated structures. Quantitative indices for assessing seismic behavior levels were chosen as the inter-story displacement angle and isolation layer displacement. Based on the calculation results, this paper presents preliminary prediction formulas for both types of indices, the relative stiffness ratio between the structure and the soil, and proposes a classification system for seismic behavior levels. Additionally, it provides a physical description of the degree of damage to small aspect ratio isolation structures under various site conditions.

Keywords: flexible foundation; isolation structure; sexual level; damage index; quantitative index

0 引言

基于性能抗震设计理论始于上世纪九十年代,该理论可以使人们清楚地知道结构在不同水平下的地震反应特征,其目的是使所设计的建筑结构在未来地震中具备预期的功能^[1]。目前基础隔震结构作为比较成熟的技术手段,已经广泛应用于实际工程,在地震灾害中起到了较好的抗震性能,而对于基础隔震结构的性能水平研究还不太多,同时,对于性能水平研究往往基于刚性地基假设,没有考虑在软弱场地的情况下,建筑物-地基的相互作用对结构损伤的影响,因此有必要开展柔性地基上隔震结构抗震性能水平研究。

国内外学者针对基础隔震结构抗震性能水平的问题已取得一些成果。刘娟等^[2]依据基于性能抗震设计理论结合高层结构的特点,将高层基础隔震结构的设防目标进行量化,为高层隔震结构的抗震设计提供了参考。刘阳等^[3]针对长周期地震作用下考虑碰撞效应的偏心隔震结构进行了损伤性能评价。杜永峰等^[4]利用结构可靠度分析方法,针对一钢筋混凝土框剪结构分析结构发生倒塌的可靠度指标,为结构的地震损失评估提供依据。然而目前还未有研究针对小高宽比基础隔震结构给出在柔性地基下的抗震性能水平划分。

综上所述,本文以小高宽比基础隔震结构为研究对象,以一拟建框架结构为背景,设计扩展出5种场地,通过ABAQUS有限元分析软件建立了土-隔震支座-上部结构静动力耦合非线性相互作用体系有限元模型,分析了不同类别场地条件下结构-土体刚度比 R 与上部结构损伤指数、隔震层损伤指数之间的关系,研究了不同类别场地条件下小高宽比隔震结构层间位移角SSI影响率、隔震层位移SSI影响率与结构-土体刚度比 R 的拟合关系,初步给出了不同类别场地条件下小高宽比隔震结构的抗震性能水平划分及其地震破坏的物理描述。

1 数值模型的建立

1.1 几何模型的建立

本模型的尺寸参照某建筑方案。方案中,本建筑总高度为21.6 m,层数为6层,层高为3.6 m,纵向长40.89 m,横向宽11.6 m最大高宽比为1.86,小于4,满足规范的高宽比要求。基础的形式参照设计文件,为承台与桩的复合基础。承台厚度为2 m,桩长18 m,桩端穿越夹层中的软土,嵌入底层刚度较大的砂土中,柱和桩均由三维梁单元建立。上部结构的梁柱采用三维梁单元建立,并参照设计文件,对处于不同位置、具有不同截面尺寸的梁柱赋予对应的截面属性;楼面板采用三维壳单元建立,并在

材料属性中赋其对应的厚度,板与梁之间采用绑定连接;图1为本结构模型示意。

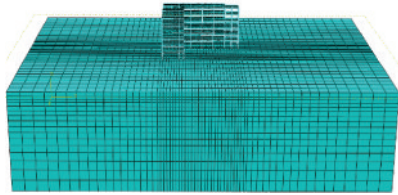


图1 模型示意

Fig.1 Schematic diagram of the model

地基土层为三维实体单元,场地的宽度大于结构的横向尺寸5倍时,基本可以忽略横向边界对结构动力反应的影响^[5],故选定地基模型的横向尺寸为200 m,土层厚度为80 m。为简化计算量,土体的网格采用线性网格,在靠近结构周围加密,在远离结构的区域,随着与结构的距离增大,网格横向尺寸从1 m逐渐增大到4 m。实体部件如土层采用八节点缩减积分单元,壳体部件采用四节点缩减积分单元,线部件采用B31单元。线性缩减积分单元存在网格沙漏问题,因此采用较高精度的网格划分与

设置网格属性为 enhanced 来克服该问题。在静力分析步中,边界条件为沿重力方向自由,其他方向固定,而在动力分析步中,则将边界条件转换为沿振动方向自由,其他方向固定,具体分析方法见文献[6]。

1.2 不同场地条件的设定

《建筑抗震设计规范(2016版)》^[7]根据土层等效剪切波速将场地划分为四类,通过改变土体等效剪切波速,调整剪切波速为100、200、400、800 m/s 分别为Ⅳ、Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ四类类场地条件见表2,同时将土层删除作为刚性地基,共计五类场地,以Ⅲ场地为例,从上到下土体剪切波速分别为100、150、230 m/s,在表1给出了场地条件及参数。基于剪切波速计算结构-土体相对刚度比R公式如下^[6]:

$$R = \frac{h}{TV_s} \quad (1)$$

式中,R为结构-土体相对刚度比;h为上部结构质心到隔震层的距离,本结构为15.3 m;T为结构的自振周期,本文采用顶点位移法计算为0.565 s;V_s为场地的剪切波速。

表1 场地条件及其参数

Table 1 Site conditions and their parameters

土层编号	土性	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	层厚/m	动泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	黏土	19.4	10	2	0.49	15.4	16
2	砂土	20.5	21	18	0.49	5.0	30
3	黏土	19.4	35	60	0.49	21.0	26

1.3 土与混凝土本构模型

本章的硬土地基模型及软夹层地基模型采用庄海洋等^[8-9]建立的土体黏塑性动力本构模型。由于隔震结构的隔震层能有效减少地震能量向上部结构输入,上部结构的地震反应较小,通常处于弹性状态,故混凝土材料与钢材均采用弹性本构模型。上部结构及基础的混凝土强度为C30,承台混凝土里的钢筋采用Q235钢筋,采用弹性模型模拟,弹性模量为210 GPa。本文不考虑钢筋与混凝土间的分离与滑移。

1.4 隔震支座的参数与设置

本文采用铅芯橡胶隔震支座LRB600,主要由上连接板、下连接板、叠层橡胶、滑板和不锈钢板组

成。橡胶作为一种超弹性材料,能够在结构发生较大变形时保持弹性。根据文献[10],橡胶采用C3D8H杂交单元模拟,抗拉强度取15 MPa。铅采用理想的弹塑性模型,弹性模量E = 17.5 GPa,单轴抗拉屈服强度取17.75 MPa,泊松比为0.44,采用C3D8单元模拟铅芯材料。采用C3D8单元模拟薄钢板,弹性模量E = 205 GPa,泊松比为0.3,采用C3D8单元模拟薄钢板,如图2所示。隔震支座参数采用目前工程中常用支座参数,见表3。

《建筑抗震设计规范》^[7]规定:隔震层宜设置在结构的底部和下部,其橡胶隔震支座应设置在受力较大的位置,间距不宜过大,数量和分布应根据竖向承载力、侧向刚度和阻尼的要求通过计算确定,隔震支座参照规范沿柱底布置。

表 2 不同场地类别划分

Table 2 Various site classifications employed in this study

场地类别	覆盖厚度/ m	等效剪切 波速/ (m·s ⁻¹)	结构-土 体刚度 比	场地划分标准
I	80	800	0.034	$V > 500$
II	80	400	0.068	$d \geq 5$ 且 $250 < V \leq 500$
III	80	200	0.135	$d > 50$ 且 $150 < V \leq 250$
IV	80	100	0.271	$d \geq 80$ 且 $V \leq 150$

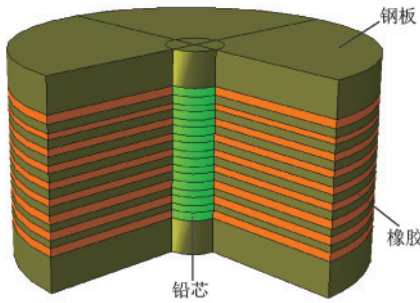


图 2 铅芯橡胶隔震支座示意

Fig.2 Schematic diagram of lead-core rubber isolation bearing

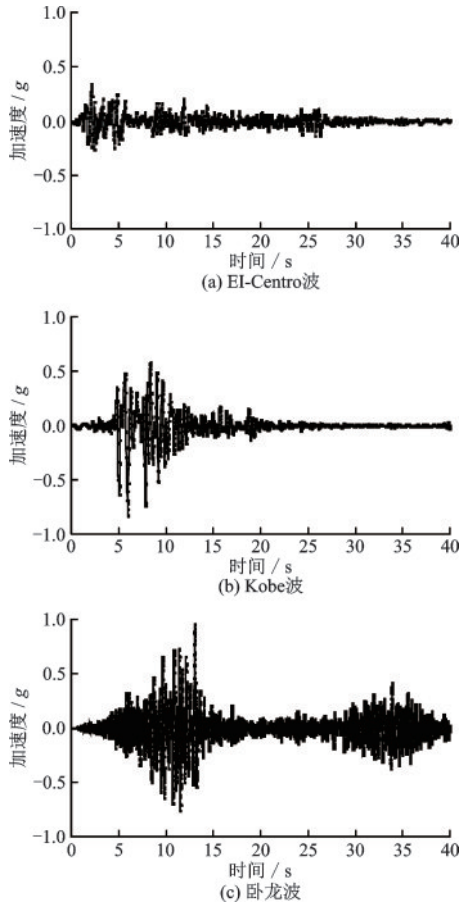


图 3 输入地震波时程图

Fig.3 Input seismic wave time history curves

1.5 输入地震动

本文选取 Kobe 波、EI-Centro 波以及卧龙波作为输入地震动,3 条地震动的时程如图 3 所示。地震动频率也是影响地下结构地震反应的重要因素,根据文献[11]对于地震动的分类,卧龙波属于高频波;Kobe 波属于中频波;EI-Centro 波属于中频波。本文所选输入地震动分别具有中低频及高频的振动特征。对于土性地基,把地震动的峰值加速度分别调整为 0.1g,0.2g,0.3g,0.4g 和 0.5g,地震动从模型地基地部水平向输入。对于刚性地基,读取土性地基每个工况下土表加速度时程,作用于刚性地基上。

2 损伤统计分析

2.1 上部结构损伤

结构在地震作用下会发生两种破坏,一种是在地震猛烈作用下,结构的强度、位移等指标首次突破限值直接造成破坏,另一种是塑性累积损伤破坏,虽然在地震作用下结构没有达到极限值,但是在多次地震循环累积的作用下,结构和构件的强度、刚度等性能发生累积损伤,最终导致破坏^[12]。基于上述两种破坏形式,在损伤评估的过程中应考虑到变形和耗能的影响。

损伤评估方法在地震破坏研究中逐渐成熟。目前的损伤分析直接选取反映构件整体性能的参数建立经验或半经验的损伤模型,进而计算得到损伤指标。本文的研究主要是综合考虑结构最大层间位移响应和塑性累积损伤,因此上部结构损伤指数采用简化 Park-ang 损伤模型^[13]:

$$D_{pa} = \frac{X_{max}}{X_d} + \delta \frac{F_{max} X_{max}}{F_d X_d} \quad (2)$$

式中, X_{max} 为最大层间变形; X_d 为变形限值; F_{max} 为上部结构最大层间力; F_d 为力的限值; δ 为累积损伤程度的影响系数,本文取 0.15。

损伤指数的计算一般介于 0~1 之间,0 代表无损伤状态,1 代表损伤破坏失效状态。表 4 给出了上部结构损伤指数范围与损伤程度之间的关系。

图 4 给出了输入地震动为 EI-Centro 波、Kobe 波、卧龙波时,不同输入地震动强度下上部结构损伤指数 D_{pa} 和结构-土体刚度比 R 之间的关系。 $R=0$ 为刚性地基计算下结果,总体上来看,上部结构损

表3 隔震支座参数

Table 3 Parameters of isolation bearing

支座直径/mm	容许水平位移/ mm	竖向承载力/ kN	水平等效刚度/ (kN·mm ⁻¹)	屈服后刚度/ (kN·mm ⁻¹)	竖向压缩刚度/ (kN·mm ⁻¹)	等效阻尼比/%
600	330	3 600	2.64	1.83	3 627	17

表4 上部结构不同性能水准下损伤指数范围

Table 4 Damage index range for superstructure at different performance levels

损伤指数范围	损伤程度	性能水准
0~0.1	可以忽略	I:运行安全
0.1~0.2	轻微损伤	II:直接居住
0.2~0.5	中等损伤	III:损伤控制
0.5~0.8	严重损伤	IV:生命安全
0.8~1.0	濒临倒塌	V:防止倒塌
>1.0	倒塌	建筑损失

伤指数随着结构-土体刚度比 R 增加而增加,在输入 $0.1g, 0.2g$ 作用下, EI-Centro 波、Kobe 波、卧龙波在不同刚度比场地下的损伤指数均在 $0\sim 0.1$ 之间,处于损伤可以忽略,运行安全的阶段,在输入 $0.3g$ 地震动作用下, EI-Centro 波、Kobe 波和卧龙波随着结构-土刚度比 R 的增加,逐渐从可忽略阶段向轻微损伤阶段过渡,在输入 $0.4g$ 地震动时, EI-Centro 波作用在四类场地条件下过渡到中等损伤阶段, Kobe 波和卧龙波处于轻微损伤阶段,在输入地震动 $0.5g$ 时,三种工况下地震波均由轻微损伤向中等损伤过渡。

由上述分析可知基于刚性地基假定设计的隔震结构在大震情况下的损伤急剧增大,为定量分析土性地基上隔震结构相对于刚性地基时上部结构损伤变化程度,结合公式 2 选取上部结构最大层间位移角作为定量指标,同时定义上部结构层间位移角 SSI 影响率 α :

$$\alpha = \frac{\theta_{\max}}{\theta_{\max-fir}} \quad (3)$$

式中, θ_{\max} 为相同基底加速度峰值 (PGA) 输入下土性地基上隔震结构最大层间位移角; $\theta_{\max-fir}$ 为相同基底加速度峰值 (PGA) 输入下刚性地基上隔震结构最大层间位移角。

图 5 给出了不同地震动作用下层间位移角 SSI 影响率与结构-土刚度比 R 之间的关系,总体来看,在 $PGA=0.1g$ 且场地条件较好时 EI-Centro 波和卧龙波隔震结构层间位移角影响率小于 1,主要原因是小震下结构-土体相对刚度比相对较小时,场地土

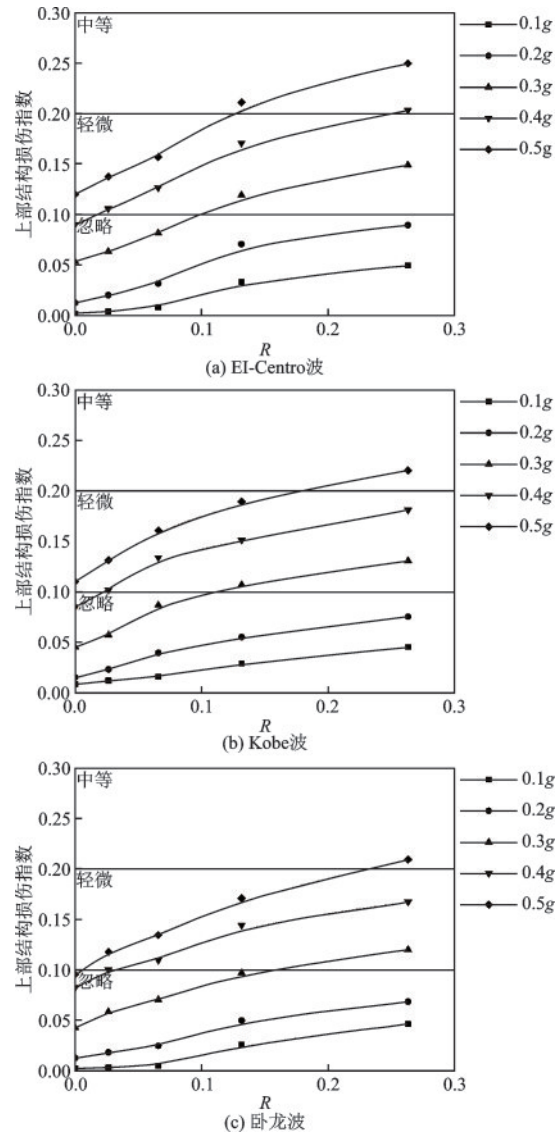


图4 不同地震动作用下上部结构损伤指数与结构-土刚度比 R 关系

Fig.4 Relationship between damage index of superstructure and structure-soil stiffness ratio (R) under different seismic waves

性相对较硬,输入地震动出现高频化的同时,土-结构动力相互作用的影响较小,上部结构层间位移角因而较小。随着 PGA 的增大及场地变差,三种地震波作用下上部结构层间位移角 SSI 影响率逐渐增大均大于 1, EI-Centro 增幅略大于 Kobe 波,卧龙波最小。在 $PGA=0.5g$ 且地基条件较差时,三种地震波

作用下上部结构层间位移角SSI影响率达到其最大值, EI-Centro波最大为1.71, Kobe波为1.66, 卧龙波为1.59。其原因在于大震下结构-土体相对刚度比较大时, 场地土性较软, 输入地震动出现长周期化的同时, 土-结构动力相互作用的影响增大, 这降低了隔震层的隔震效率, 使上部结构的地震反应增大。

为给基于刚性地基假定设计的隔震结构提供依据, 本文给出了大震($PGA \geq 0.3g$)下上部结构层间位移角SSI影响率与结构-土体相对刚度比的指数拟合结果, 如图6所示。上部结构层间位移角SSI

影响率随结构-土体相对刚度比的增大总体上呈增大趋势, 在0.3g地震波的输入下, Kobe波略大于EI-Centro波, 达到1.58, 在0.4g和0.5g作用下, EI-Centro波最大, Kobe波其次, 卧龙波最小。针对于本文的小高宽比结构, 指数预测公式可较好预测大震($PGA \geq 0.3g$)情况下不同场地的上部结构层间位移角SSI影响率。

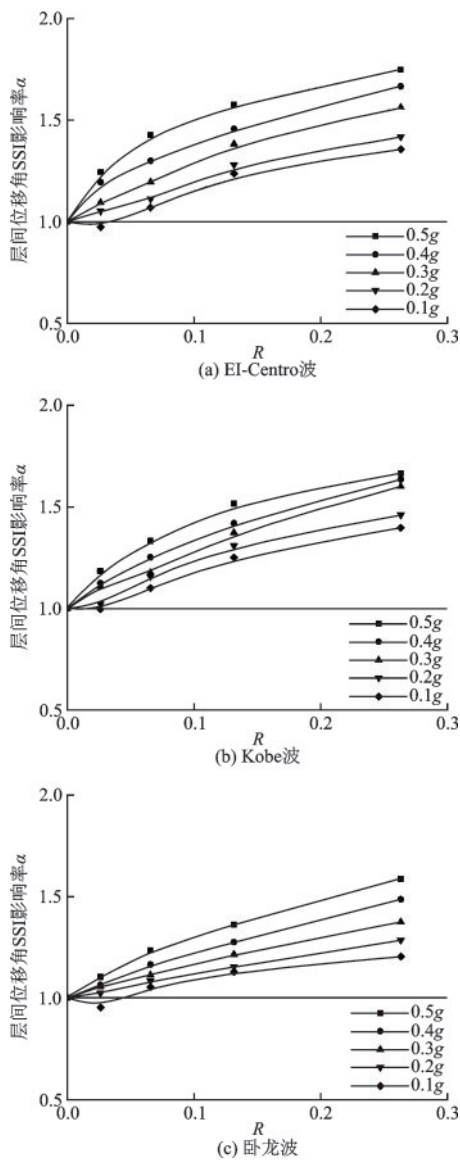


图5 不同地震动作用下层间位移角SSI影响率 α 与结构-土刚度比示意

Fig.5 Schematic diagram of interlayer displacement angle SSI influence rate α and structure-soil stiffness ratio

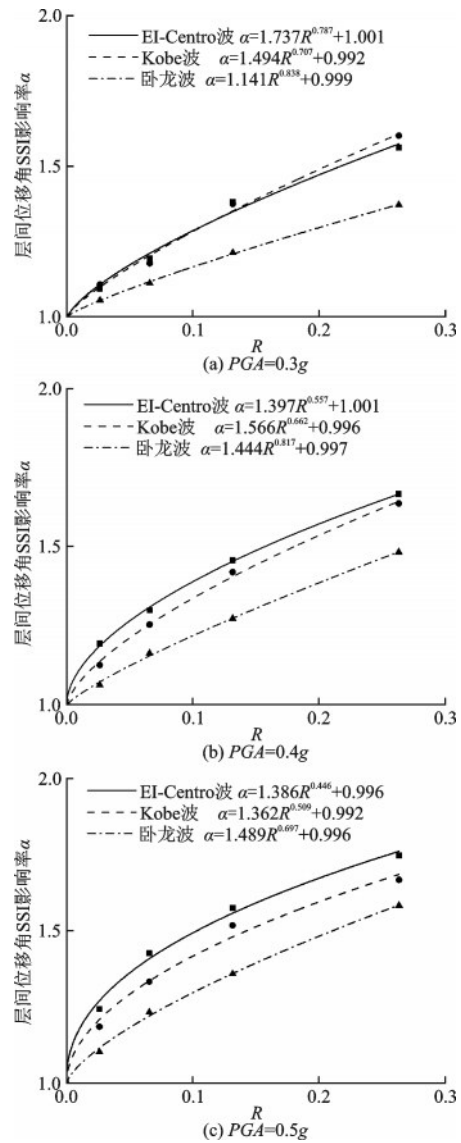


图6 层间位移角SSI影响率 α 与结构-土体相对刚度比拟合曲线

Fig.6 Influence rate of interlayer displacement angle SSI α Fitting curve with structure-soil relative stiffness ratio

2.2 隔震层损伤

结合公式3, 隔震支座水平剪切损伤指数计算

公式如下：

$$D_b = \frac{\eta_{\max}}{\eta_d} + \delta \frac{F'_{\max} \eta_{\max}}{F'_d \eta_d} \quad (4)$$

式中, η_{\max} 为隔震支座最大层间变形; η_d 为隔震支座变形限值; F'_{\max} 为隔震支座受力最大值; F_{\max} 为隔震支座受力的限值; δ 为累积损伤程度的影响系数, 本文取 0.15。

表 5 隔震支座损伤指数与损伤程度关系

Table 5 Relationship between damage index and damage degree of isolation bearing

损伤指数范围	损伤程度
0~0.36	可以忽略
0.36~0.55	轻微损伤
0.55~0.73	中等损伤
0.73~1	严重损伤
>1	倒塌

下部隔震层的损伤程度依据我国现行《建筑抗震设计规范》^[7]结合文献[14], 给出表 5 隔震支座损伤指数范围与损伤程度之间的关系。

图 7 给出了不同地震动作用下隔震层损伤指数 D_b 和结构-土刚度比 R 之间的关系, 总体来看, 隔震层损伤指数随着 R 的增大而增大。

与上部结构损伤指数不同, 在输入 0.1g 情况下, EI-Centro 波和 Kobe 波的隔震层损伤指数随着 R 的增大而最终均超过 0.36, 从忽略阶段过渡到轻微损伤阶段, 卧龙波则一直处于可忽略阶段, 在输入 0.2g 的情况下, EI-Centro 波和卧龙波从忽略阶段过渡到轻微损伤阶段, Kobe 波在 $R=0.26$ (IV 场地) 时损伤指数为 0.57, 达到中等损伤阶段。在 0.3g 时, 隔震层的损伤指数变化范围更广, 随着 R 的增加, EI-Centro 波、Kobe 波从可忽略阶段发展到严重破坏阶段, 卧龙波从可忽略阶段发展到中等破坏阶段, 在 0.4g 作用下, EI-Centro 波从轻微破坏阶段到倒塌, Kobe 波从轻微破坏阶段到濒临倒塌, 卧龙波从可忽略阶段到严重阶段, 在 0.5g 作用下, EI-Centro 波、kobe 波在 R 大于 0.06 时, 均处于倒塌阶段, 卧龙波在 $R=0.26$ (IV 场地) 为倒塌阶段。

与上部结构损伤指数随着 R 的变化相比, 在输入相同地震动相同结构-土刚度比作用下, 同样是 IV 场地损伤最大, 刚性地基最小, 但相较而言, 隔震层损伤指数变化范围更广, 幅度更大, 从忽略阶段变化到倒塌阶段, 其原因在于当隔震支座吸收了大

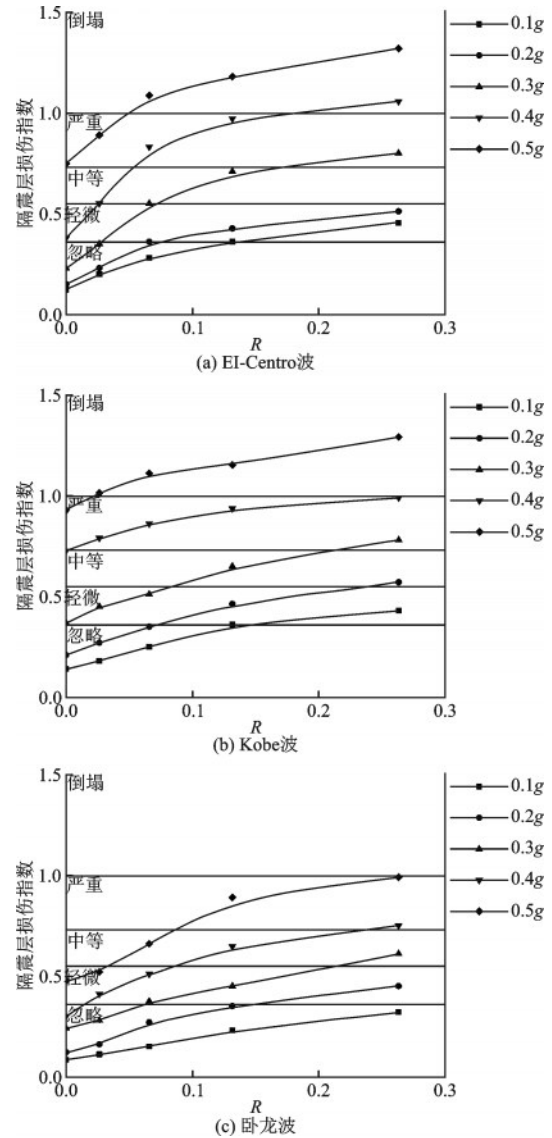


图 7 不同地震动作用下隔震层损伤指数与结构-土刚度比 R 之间的关系

Fig.7 Relationship between damage index of isolation layer and soil structure stiffness ratio (R)

量能量, 从而减小了上部结构的损伤。为定量分析土性地基上隔震结构相对于刚性地基时隔震层损伤变化程度, 选取隔震层最大位移作为定量指标, 同时定义隔震层最大位移 SSI 影响率 β :

$$\beta = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\max - fix}} \quad (5)$$

式中, Δ_{\max} 为相同基底加速度峰值 (PGA) 输入下土性地基上隔震结构隔震层最大位移; $\Delta_{\max - fix}$ 为相同基底加速度峰值 (PGA) 输入下刚性地基上隔震结构隔震层最大位移。

参照 2.1 节, 图 8 给出了不同地震动作用下隔震结构隔震层位移 SSI 影响率与结构-土体相对刚度

比 R 的关系。在 $PGA=0.1g$ 且场地条件较好时层间隔震层位移 SSI 影响率均不超过 1, 这与本文 $PGA=0.1g$ 时上部结构层间位移角 SSI 影响率变化规律相似。与上部结构层间位移角相比, 隔震层位移 SSI 影响率增长更为显著, $PGA \geq 0.3g$ 且场地条件 ($R > 0.13$) 时, EI-Centro 波和 Kobe 波隔震层位移 SSI 影响率超过 1.41, 卧龙波超过 1.33, 此时隔震结构可能因隔震层位移过大导致隔震支座发生失稳或强度破坏, 这一规律在隔震结构的抗震设计中应充分考虑。

图 9 给出了大震 ($PGA \geq 0.3g$) 下隔震层位移

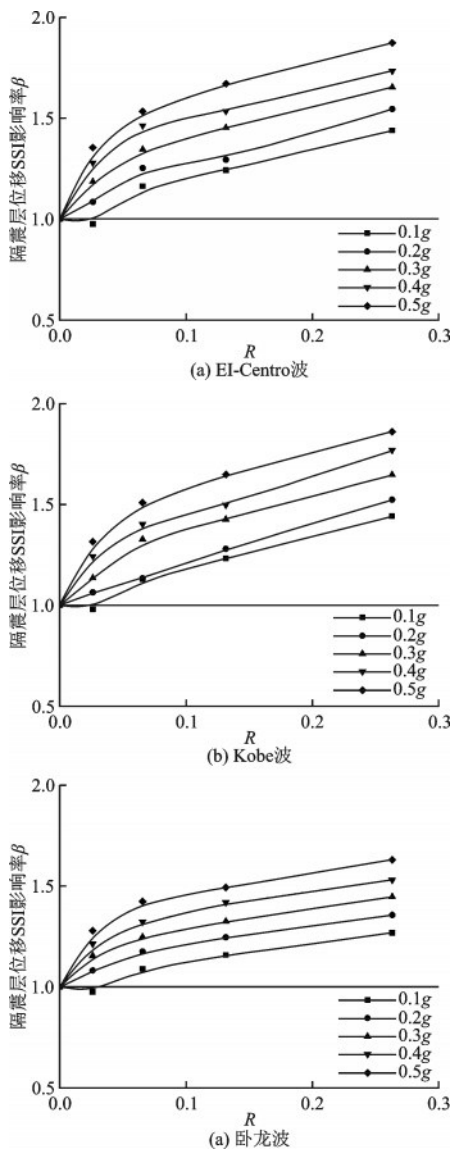


图 8 不同地震动作用下隔震层位移 SSI 影响率 β 与结构-土刚度比 R 之间的关系

Fig.8 SSI influence rate of isolation layer displacement β Relationship between and structure-soil stiffness ratio (R)

SSI 影响率与结构-土体相对刚度比的指数拟合结果, 隔震层位移 SSI 影响率 α 随结构-土体相对刚度比的增大呈增大趋势, EI-Centro 波总体上略大于 Kobe 波, 卧龙波最小, 从隔震层位移来看, 依旧是中长周期波对于隔震结构损伤最大。

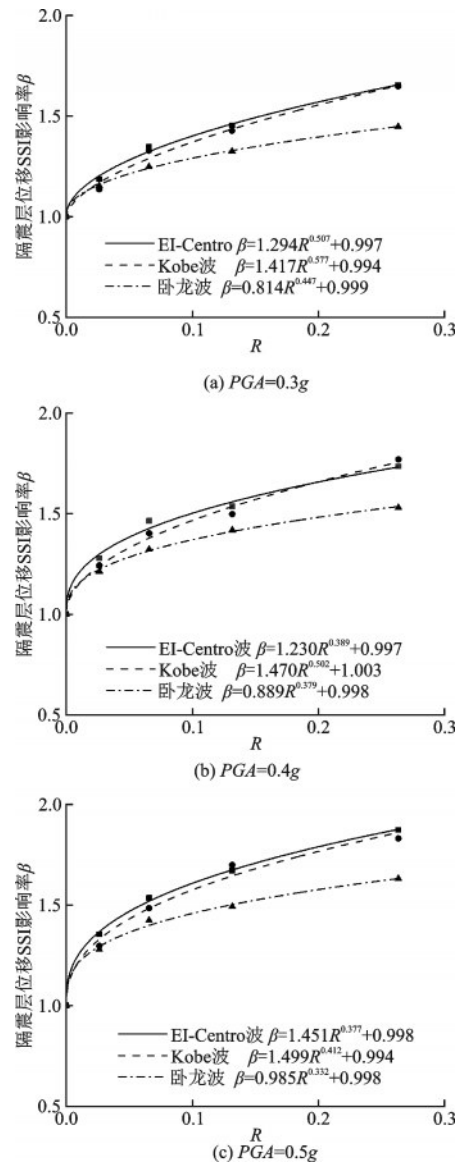


图 9 隔震层位移 SSI 影响率 β 与结构-土体相对刚度比 R 拟合曲线

Fig.9 SSI influence rate of isolation layer displacement β Fitting curve with structure-soil stiffness ratio (R)

3 抗震性态水平划分

3.1 层间位移角量化指标

由于输入 EI-Centro 波时结构的地震反应最为

强烈,且卧龙波和Kobe波反应与EI-Centro波规律一致,因此本节以输入EI-Centro波的计算结果为主要分析对象。需要说明的是,因为隔震支座的存在,使得上部机构的损伤明显滞后于隔震支座损伤,因2.1节的计算上部结构未达到破坏阶段,本文补算加大输入EI-Centro波的幅值,直至上部结构达到倒塌阶段。同时,相对而言,建于I类场地中的结构较少,因此本文抗震性态水平量化指标以II、III、IV类场地为主。

根据2.1节对上部结构损伤的分析,综合考虑对于上部结构层间位移角能够较好的反应结构的破坏程度,因此选取层间位移角作为量化指标,根据不同破坏程度下结构对应的层间位移角幅值,将本文小高宽比基础隔震结构层间位移的抗震性态水平划分为可以忽略、轻微损伤、中等损伤、严重损伤、濒临倒塌、倒塌六个阶段,图10给三类场地下层间位移角与损伤指数的关系,进而表6给出了三类场地下各个性态的层间位移角限值指标。

本文划分的上部结构可忽略阶段是指上部结构基本完好,功能设施不受影响;轻微损伤阶段是上部结构基本完好,结构基本无破坏,在结构的部

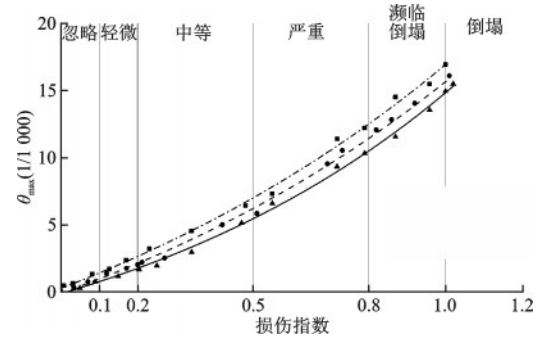


图10 三类场地下层间位移角与损伤指数示意

Fig.10 Schematic diagram of displacement angle and damage index between underground layers in class three field

分区域出现轻微受损的现象,室内人员无生命危险;中等损伤阶段是非承重构件有中等程度破坏,室内设置开始出现滑移、错位等现象,人员需要立即撤出建筑物;严重损伤是指上部结构承重构件因破坏严重而导致功能基本丧失,上部结构部分区域出现坍塌,人员可能无法撤出建筑物,生命安全可能受到威胁;濒临倒塌阶段是指各个主要连接部位破坏严重,大部分接近垮塌,震后需拆除;倒塌阶段是指上部结构整体倒塌。

表6 小高宽比基础隔震结构层间位移角性态水平划分

Table 6 Horizontal division of story displacement angle behavior of base isolated structure with small aspect ratio

性态水平	层间位移角限值(1/1 000)		
	II场地	III场地	IV场地
忽略	$\theta_{max} \leq 1.42$	$\theta_{max} \leq 0.98$	$\theta_{max} \leq 0.73$
轻微	$1.42 < \theta_{max} \leq 2.64$	$0.98 < \theta_{max} \leq 2.13$	$0.73 < \theta_{max} \leq 1.76$
中等	$2.64 < \theta_{max} \leq 6.65$	$2.13 < \theta_{max} \leq 6.15$	$1.76 < \theta_{max} \leq 5.32$
严重	$6.65 < \theta_{max} \leq 12.53$	$6.15 < \theta_{max} \leq 11.41$	$5.32 < \theta_{max} \leq 10.43$
濒临倒塌	$12.53 < \theta_{max} \leq 16.92$	$11.41 < \theta_{max} \leq 15.74$	$10.43 < \theta_{max} \leq 14.91$
倒塌	$\theta_{max} > 16.92$	$\theta_{max} > 15.74$	$\theta_{max} > 14.91$

3.2 隔震层位移量化指标

结合《建筑隔震橡胶支座》^[10]和2.2节,将本文小高宽比基础隔震结构隔震层位移的抗震性态水平划分为可以忽略、轻微损伤、中等损伤、严重损伤、倒塌五个阶段,图11给三类场隔震层位移与损伤指数的关系,进而表7给出了三类场地下各个性态的隔震层位移限值指标。

结合之前学者对于隔震支座的破坏研究^[15-17],本文划分的隔震层损伤可忽略阶段是隔震支座外观完好,隔震层功能不受损,能够正常工作;轻微损

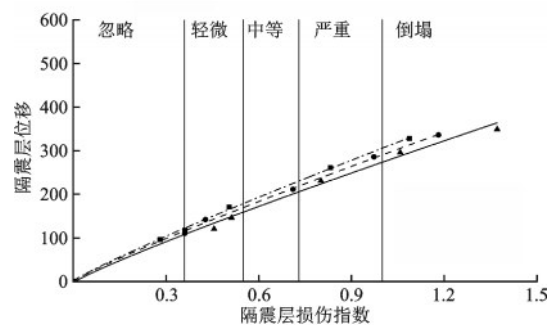


图11 三类场隔震层位移与损伤指数示意

Fig.11 Schematic diagram of displacement and damage index of isolation layer in class three field

伤阶段是在部分区域隔震支座外部出现轻微鼓出,隔震支座内部橡胶层可能出现局部剪断或内部钢板出现轻微屈服,但隔震层功能基本不受影响,隔震支座依然能够正常工作;中等损伤是隔震层受损区域进一步扩大,隔震支座外部侧面鼓出扩大呈现“S”形,内部的橡胶层断点形成拉断现象,但隔震支

座仍可发挥作用;严重损伤是隔震层功能受严重影响,部分隔震支座已经失去承载力,但隔震层的整体承载力仍能基本保证结构安全;倒塌阶段是隔震层功能基本丧失,隔震层位移超出允许限值,隔震支座发生大规模受剪、受拉或滚翻而导致整体失稳。

表7 小高宽比基础隔震结构隔震层位移性态水平划分

性态 水平	隔震层位移		
	II场地	III场地	IV场地
忽略	(0,0.98Tr]	(0,0.92Tr]	(0,0.88Tr]
轻微	(0.98Tr,1.48Tr]	(0.92Tr,1.41Tr]	(0.88Tr,1.31Tr]
中等	(1.48Tr,1.92Tr]	(1.41Tr,1.81Tr]	(1.31Tr,1.69Tr]
严重	(1.92Tr, min(2.54Tr,0.51D)]	(1.81Tr, min(2.41Tr,0.48D)]	(1.69Tr, min(2.27Tr,0.45D)]
倒塌	>min(2.54Tr,0.51D)	>min(2.41Tr,0.48D)	>min(2.09Tr,0.45D)

4 结 论

本文针对拟建建筑物,建立该小高宽比基础隔震结构建筑物的有限元计算模型,分析了地震动特性、场地条件以及输入地震动加速度峰值对小高宽比基础隔震结构地震反应的影响规律,选取层间位移角、隔震层位移为量化指标,提出了小高宽比隔震结构的抗震性态水平,得出了以下结论。

(1)随着结构-土刚度比 R 的增大,上部结构损伤指数、隔震层损伤指数均不断增加,上部结构的损伤明显滞后于隔震支座损伤,IV场地在同等条件下损伤最严重。

(2)输入地震波的特性对隔震结构损伤影响较大,表现为中长周期地震波对于隔震结构损伤影响较大。

(3)本文选取层间位移角、隔震层位移作为小高宽比隔震结构抗震性态水平的量化指标,在强震作用($PGA \geq 0.3g$)下本文小高宽比隔震结构的层间位移角SSI效应影响率和隔震层位移SSI效应影响率可近似表示为结构-土刚度比 R 的指数函数。

(4)初步给出了不同类别场地上小高宽比基础隔震结构的抗震性态水平划分及其破坏程度的物理描述,其抗震性态水平划分为忽略、轻微、中等、严重和倒塌五个抗震性能水平。

参考文献:

- [1] 谢礼立,马玉宏.基于抗震性态的设防标准研究[J].地震学报,2002(02):200-209.
Xie L L, Ma Y H. Study on fortification standards based on seismic behavior [J]. Journal of Seismology, 2002 (2): 200-209. (in Chinese)
- [2] 刘娟,马玉宏,赵桂峰,等.高层基础隔震结构基于性态的抗震设防标准研究[J].科学技术与工程,2013,13(26):7889-7893.
Liu J, Ma Y H, Zhao G F, et al. Study on behavior based seismic fortification standards of high-rise base isolated structures [J]. Science, Technology and Engineering, 2013,13 (26): 7889-7893. (in Chinese)
- [3] 刘阳,刘文光,何文福,等.长周期地震作用下考虑碰撞效应的偏心隔震结构损伤性能评价[J].振动工程学报,2015,28(6):910-917.
Liu Y, Liu W G, He W F, et al. Damage performance evaluation of eccentric isolated structures considering collision effect under long-period earthquake [J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28 (6): 910-917. (in Chinese)
- [4] 杜永峰,黄小宁,李慧.基于性能的基础隔震钢筋混凝土框剪结构的倒塌可靠度分析[J].地震工程学报,2018,40(5):879-886.
Du Y F, Huang X N, Li H. Collapse reliability analysis of performance-based base isolated reinforced concrete

- frame shear wall structure [J]. *Journal of Seismic Engineering*, 2018, 40 (5): 879-886. (in Chinese)
- [5] 楼梦麟, 王文剑, 朱彤. 土-结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题[J]. *地震工程与工程振动*, 2000, 20(2): 30-36.
- Lou M L, Wang W J, Zhu T. Soil lateral boundary effect in shaking table model test of soil-structure system [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2000, 20(2): 30-36. (in Chinese)
- [6] 庄海洋, 任佳伟, 王瑞, 等. 两层三跨框架式地铁地下车站结构弹塑性工作状态与抗震性能水平研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(1): 131-138.
- Zhuang H Y, Ren J W, Wang R, et al. Elasto-plastic working states and seismic performance levels of frame-type subway underground station having two layers and three spans [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(1): 131-138. (in Chinese)
- [7] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [8] Zhuang H Y, Hu Z H, Chen G X. Numerical modeling on the seismic responses of a large underground structure in soft ground [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2015, 17(2): 802-815.
- [9] 庄海洋. 土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2006.
- Zhuang H Y. Study on nonlinear dynamic soil-underground structure interaction and its large-size shaking table test [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2006. (in Chinese)
- [10] 建筑隔震橡胶支座: JG/T 118-2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [11] Tso W, Zhu T, Heidebrecht A. Engineering implication of ground motion A/V ratio [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1992, 11(3): 133-144.
- [12] 杜永峰, 杨晨晓, 黄小宁. 支座失效下基础隔震结构的损伤路径识别[J]. *兰州理工大学学报*, 2019, 45(1): 112-119.
- Du Y F, Yang C X, Huang X N. Damage path identification of base isolated structure under bearing failure [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2019, 45 (1): 112-119. (in Chinese)
- [13] Park Y J, Ang A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 11(4): 722-739.
- [14] 丁雅杰. 考虑地基不均匀沉降的基础隔震结构损伤分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- Ding Y J. Damage analysis of base isolated structure considering uneven settlement of foundation [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [15] 马玉宏, 赵桂峰, 谭平, 等. 基础隔震结构性能水准和性能目标的研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2013, 39(5): 169-173.
- Ma Y H, Zhao G F, Tan P, et al. Study on structural state level and behavior target of base isolation [J]. *Sichuan Institute of building science*, 2013, 39 (5): 169-173. (in Chinese)
- [16] Chang F K. Human response to motion in tall buildings [J]. *Journal of the Structural Division, ASCE*, 1973, 199 (6): 1259-1272.
- [17] 林凯. 基础隔震结构性能化设计指标研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- Lin K. Study on performance-based design index of base isolated structure [D]. Wuhan: Huazhong University of science and technology, 2015. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)