

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201912083

砂土液化对基础隔震结构地震反应的影响分析*

朱明轩¹, 陈礼飞², 于旭³, 庄海洋¹, 吴晓飞⁴

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 扬州工业职业技术学院建筑工程学院, 江苏 扬州 225127;
3. 南京工程学院建筑工程学院, 江苏 南京 211167; 4. 南京江宁经济技术开发区总公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 砂土液化会对结构的地震反应产生不可忽视的影响, 这一现象也将对基础隔震结构地震反应规律产生影响。基于有限元方法, 采用ABAQUS建立了土-隔震结构非线性动力相互作用的整体有限元分析模型, 针对不同地基液化情况对基础隔震结构地震反应规律及隔震效果的影响进行了深入分析。结果表明: 隔震结构下部桩基础能够有效提高下部地基的抗液化能力, 进而保证隔震结构的整体稳定性。总体来看, 液化场地上隔震结构的隔震效果及地震反应与输入地震动的特性相关, 近场地震作用下液化地基上隔震结构的隔震性能保持良好, 而远场强震作用下液化地基上隔震结构的隔震效果降低。同时隔震层产生较大的位移反应可能导致隔震支座失稳或强度破坏, 设计时需特别注意。

关键词: 基础隔震; 砂土液化; 数值模拟; 地震反应; 隔震性能

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0162-09

Influence of Sand Liquefaction on Seismic Response of Base Isolated Structures

ZHU Mingxuan¹, CHEN Lifei², YU Xu³, ZHUANG Haiyang¹, WU Xiaofei⁴

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;
2. Department of Civil Engineering, Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou 225127, China;
3. Department of Civil Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
4. Nanjing Jiangning Economic Technology Development General Company, Nanjing 211106, China)

Abstract: Sand liquefaction will have a non-negligible impact on the seismic response of the structure, and this phenomenon will also have an impact on the seismic response laws of the base isolation structure. Based on the finite element method, the finite element analysis model of nonlinear dynamic interaction of soil-isolated structures was established by ABAQUS. The influence of different liquefaction conditions on the seismic response laws of base-isolated structures and the isolation effect were analyzed. The research shows that the pile foundation of the isolated structure can effectively improve the liquefaction resistance of the foundation soil, and thus ensure the overall stability of the isolated structure. In general, the isolation effect and seismic response of the isolated structures on the liquefied site are related to the characteristics of the input ground motion. The isolated performance remains good

* 收稿日期: 2019-12-27; 修回日期: 2020-03-10

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: 朱明轩(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事土-结构动力相互作用的隔震结构抗震性能研究。

E-mail: 914604968@qq.com

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

E-mail: yuxurichard@sina.com

under near-field earthquakes, but reduced under far-field strong earthquakes. Besides, the large response of the isolation layer displacement may lead to the instability or strength damage of the isolation bearings. Particular attention must be paid to the design.

Keywords: base isolation; sand liquefaction; numerical simulation; seismic response analysis; isolation performance

引言

随着经济发展愈加迅速,人口快速向沿海沿江这一类高度城市化地区集中,日益稀缺的土地资源,让城市的建设者不得不选址在某些不良的场地上。我国东部位于太平洋板块与欧亚板块交界处,西南部位于欧亚板块与印度洋板块交界处,处于环太平洋地震带、欧亚地震带之间,面临严峻的地震灾害威胁^[1],不良地基上的建(构)筑物更是首当其冲。

近年来,防震技术产生了巨大的革新,从传统意义上“硬碰硬”的抗震,转变为“以柔克刚”的减隔震技术^[2-3]。隔震技术能够延长结构的自振周期,在城市面临高烈度地震时,可以有效保护室内人员的安全,保障医院、学校等公共设施的电力、能源及通讯系统正常工作,维持城市的正常运转,提高城市面临灾害的自救能力,减少地震损害。

隔震建筑可建于砂土地基上,而砂土地基在强震下可能出现砂土液化的震害,砂土液化对隔震建筑性能的影响目前尚无报道,但会对公路、铁路、水利等基础设施及房屋产生巨大的破坏^[4-8]。例如,1964年的日本新潟7.5级地震,信浓川左岸发生大面积液化,8幢公寓楼发生倾覆,新潟机场跑道发生大规模变形;1985年的墨西哥墨西哥城8.0级地震,位于Texcoco湖古湖床的墨西哥城市中心发生土壤液化,导致大量大型建筑物发生沉降;1989年发生在美国旧金山湾区的Loma Prieta地震,填土造地而成的湾区在地震作用下发生液化,Marina海滩大量木质建筑倒塌,海湾大桥位于Oakland市的一侧,地面沉降达40 cm;1995年的日本阪神大地震中,神户市的Port Island人工岛一期,已填筑部分全域发生液化,龙门吊发生严重的倾斜;2011年的东日本大地震,东京等7个城市发生大范围液化现象,各地液化区域总面积达42 km²以上。不同土性地基上SSI效应对隔震结构动力特性的影响规律并不相同^[9]。因此,探究强震作用下砂土液化场地上基础隔震结构的动力反应特性很有必要。

本文以探究在液化场地上设计建造隔震结构的

方法为出发点,以既有的隔震结构为例,采用大型商用有限元分析软件ABAQUS,建立液化土层与隔震结构、箱桩基础共同作用的二维有限元模型,系统地研究了不同的输入地震动作用下,土层液化分布特征、结构的动力反应、铅芯橡胶隔震支座的隔震效率,初步得到了液化场地的地震反应规律,研究结果可为设计建造液化场地上隔震结构提供参考与依据。

1 数值模型的建立

1.1 几何模型的建立

本模型的上部结构采用文献[10]中江苏某隔震建筑设计文件提供的几何尺寸与力学参数,取结构中中部一榀,建立二维梁单元模型,网格采用B21单元,尺寸为0.5 m。上部结构为13层,三跨框架,高48.6 m,横向尺寸18 m,高宽比小于3,满足规范要求。基础的形式参照设计文件,为箱基与桩的复合基础。箱基横向尺寸18 m,埋深为5 m,桩长18 m,自箱基底部贯通砂土层,桩端嵌入于第3层基岩中。将相邻0.5跨的恒载以惯性力施加在结构上,结构与构件的尺寸如图1所示。

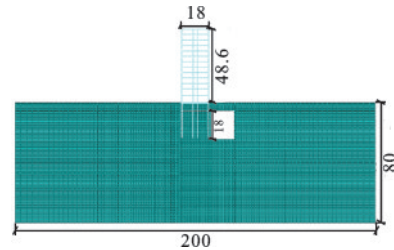


图1 二维有限元模型

Fig.1 Two-dimensional finite element model

地基土层为二维实体单元,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^[11],故选定地基模型的横向尺寸为200 m,土层厚度为80 m。为了兼顾模型计算的准确与高效,网格采用四节点平面应变减缩积分单元(CPE4R),在靠近结构的区域,土体采用尺寸1 m × 1 m的矩形网格;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。模型边界条件为在土体左右两侧和底部边界均沿激振方向自由,其余方向施加固定约束模拟。

1.2 土与混凝土的本构模型

土体的本构模型采用庄海洋等建立的砂土液化大变形本构模型^[12-13],并针对大型商用有限元分析软件进行了二次开发,编制了该本构的子程序。根据抗震设计规范,超过20 m深度的砂土层几乎不会发生液化^[14],故液化土层设置在20 m深度内。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,均采用Q235钢筋,弹性模量为210 GPa。场地条件及其参数见表1^[15],混凝土材料参数见表2^[16],钢材材料参数见表3。由于在ABAQUS软件建模中,二维的梁柱被视为一堵纵墙,与实际情况不符,因此根据庄海洋^[17]的研究结果,需按等效前后刚度不变的原理,对梁柱的材料参数进行折减,即除以两榀框架间的柱距。

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

表2 混凝土材料参数

Table 2 Concrete material parameters

材料名称	弹性模量/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比
C30混凝土	30 000	2 500	0.18

表3 钢材材料参数

Table 3 Rebar material parameters

材料名称	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	屈服应力/MPa
钢材	210	7 800	300

1.3 隔震支座的参数与设置

采用铅芯橡胶隔震支座,但由于ABAQUS软件建模中,缺少隔震支座这一构件,目前已有的ABAQUS有限元建模中通常采用Spring功能,以弹簧加阻尼的方法,模拟隔震支座。隔震支座沿柱底布置,参照本建筑的设计报告,隔震支座设计参数详见表4。支座的刚度与阻尼系数对其减隔震效果有

着很大影响^[18]。本模型中,选用型号为GZY900的隔震支座物理参数。根据于旭等^[19]对于基础隔震结构的振动台试验与数值模拟对比验证,按100%剪应变取支座的水平刚度 k 为2.1 kN/mm,等效阻尼比 ξ 为0.22,由公式 $c = \frac{2\xi}{\omega}k$ 确定阻尼系数,其中 ω 为结构的自振频率, c 为阻尼系数。

表4 隔震支座设计参数

Table 4 Parameters of seismic isolation bearings

型号 GZY900			
直径/mm	900	50%剪应变	2.9
铅芯	有	等效水平刚度/(kN·mm ⁻¹)	100%剪应变 2.1
竖向刚度/(kN·mm ⁻¹)	3 490	250%剪应变	/
竖向设计承载力/kN	9 300	50%剪应变	0.27
水平屈服力/kN	101.5	等效阻尼比	100%剪应变 0.22
屈服前刚度/(kN·mm ⁻¹)	12.7	250%剪应变	/
屈服后刚度/(kN·mm ⁻¹)	1.6	容许水平位移/mm	459

1.4 地震波的选择

按照地震波特征周期的长短,分别选用什邡八角波、Kobe波作为中短周期地震波的代表,Mexico波作为长周期地震波的代表。在输入地震动时,采用从地基土底部边界水平向输入,并将3种地震波的加速度峰值分别调整为0.1g、0.2g、0.3g、0.4g,为兼顾计算效率,取Kobe波的前30 s,什邡八角波和Mexico波的前40 s作为输入地震动。加速度反应谱如图2所示,所选地震波的加速度时程如图3所示。

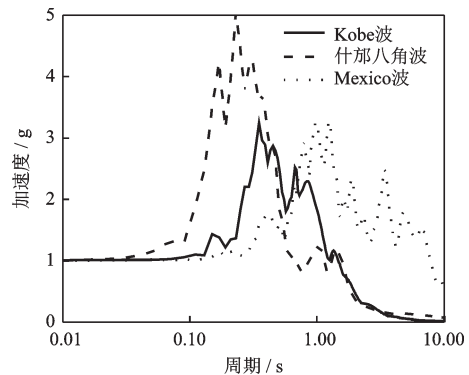


图2 选用的地震加速度反应谱

Fig.2 Selected seismic acceleration response spectrum

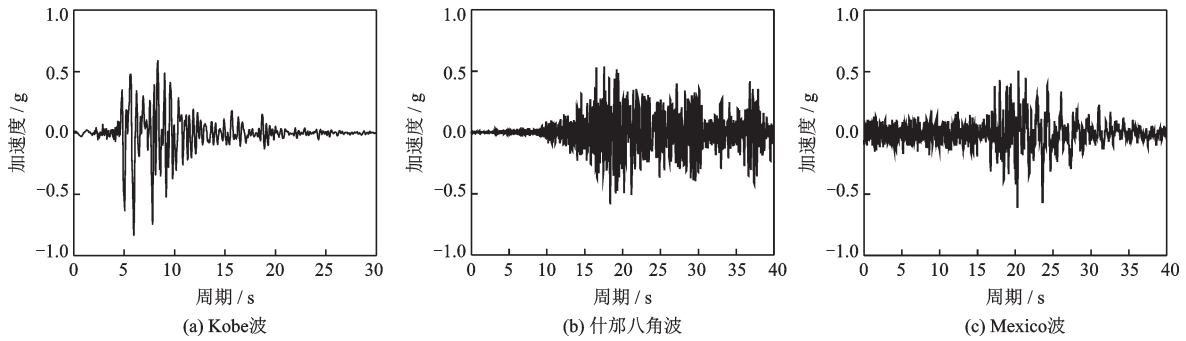


图3 输入地震波时程曲线

Fig.3 Input seismic wave time-history curve

2 计算结果的分析

2.1 土层的液化分布特征

在本文所使用的土体本构模型中,SDV52参数的力学含义为土的动孔压比。当动孔压比大于1时,视作该区域的砂土已经液化。图4为输入不同峰值加速度的Kobe波地基液化情况,什那八角波和Mexico波的液化规律与输入Kobe波时大致相当,故本文选用Kobe为例进行分析。当输入地震动的加速度峰值为

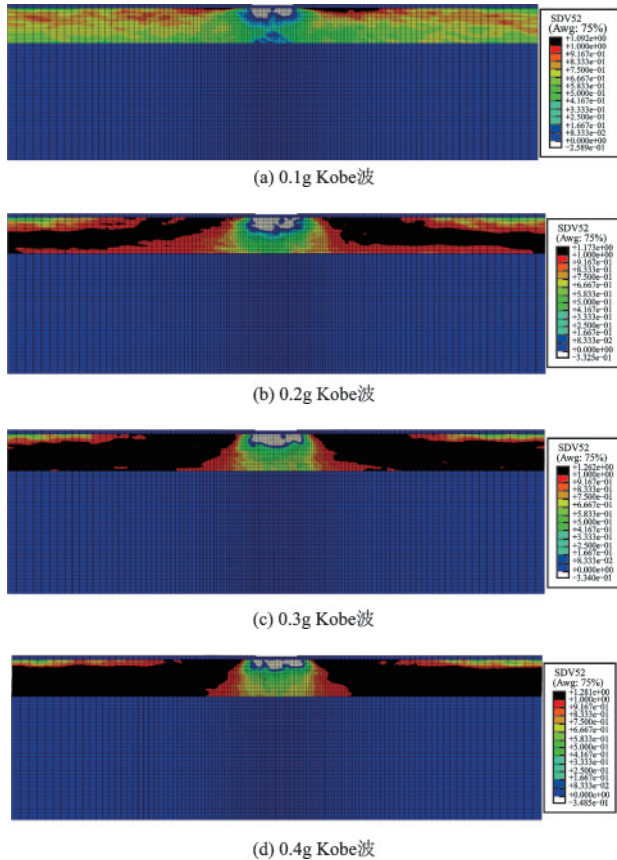


图4 地基土液化情况

Fig.4 Liquefaction of foundation soil

0.1g时,如图4(a)所示,砂土层顶部出现零星的液化区域。当输入加速度峰值为0.2g时,如图4(b)所示,液化区域沿深度方向进一步扩展。当加速度峰值增大到0.3g、0.4g时,如图4(c)、(d)所示,基础左右两侧的土层已完全发生液化。同时,因桩基础的存在,桩将明显提高周围地基的抗液化能力,因桩顶筏板与地基的相互作用,当筏板与地基分离时出现明显的负孔压区。

为了进一步分析地基液化特征,选择地基中同一埋深且位于地基3个不同位置的动孔压比时程曲线进行对比,第一点位于地下室底板中央下方的土体,第二点水平方向上距第一点25 m,第三点水平方向上距第一点50 m,在图5动孔压比时程曲线图中,分别以0、25、50 m代指上述三个位置。总体上,隔震结构筏板基础下方地基的动孔压比曲线出现先增长后迅速消散的特征,距离桩基础水平距离越远,模型地基的动孔压比越大。

2.2 隔震结构加速度反应分析

图6为结构分别在Kobe波、什那八角波和Mexico波作用下隔震结构各层的加速度峰值放大系数。从整体来看,结构的加速度曲线呈现中间层较小,底层与顶层较大的特征,与刘伟庆等^[20]开展的液化场地上隔震结构楼层加速度的分布规律相似。由图6可以看出,在近场地震波Kobe波、什那八角波作用下,隔震结构上部楼层加速度峰值放大系数随输入地震动的增大而减小,即输入地震动峰值越大,隔震效果越好,下部楼层呈现出输入地震动峰值越大,隔震效果越差,但加速度放大系数远小于1,仍有很好的隔震效果;在远场地震波Mexico波作用下,当输入地震动峰值从0.1g增加至0.3g时,结构上部楼层加速度峰值放大系数不断增大,部分楼层加速度放大系数大于1,即输入地震动峰值越大,隔震效果越差,而下层结构随输入地震动峰值越增大,加速度峰值放大系数不断减小,隔震效果越好。当输入地震

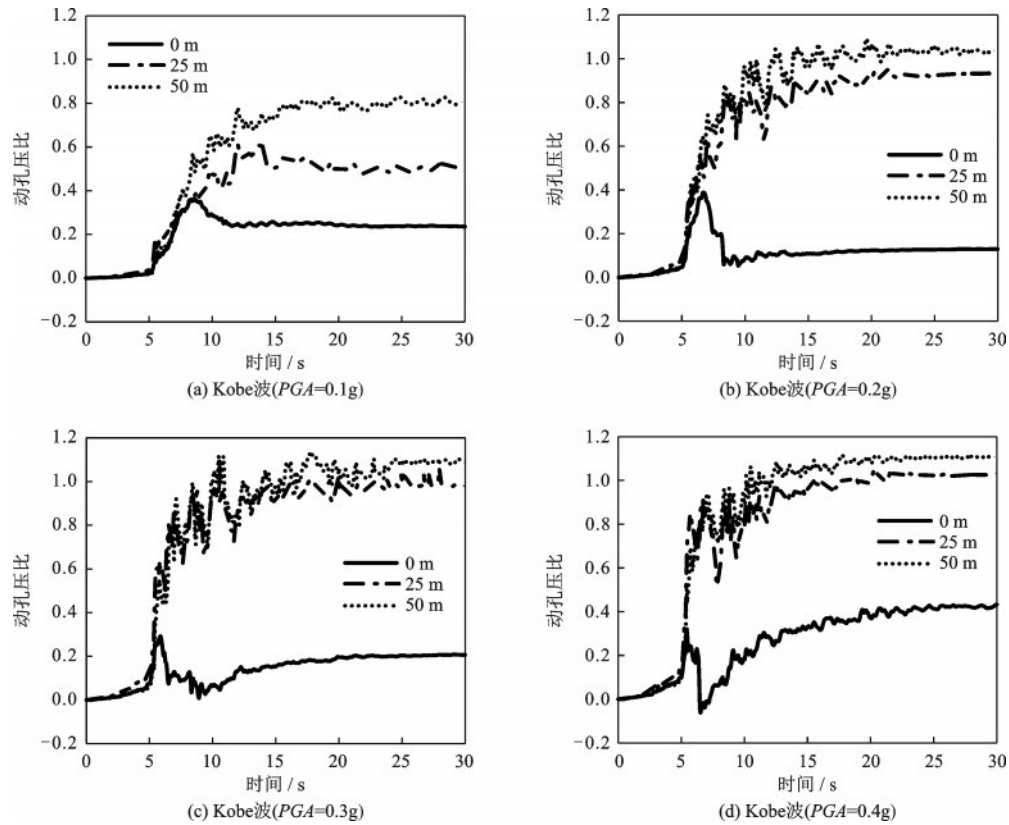


图5 动孔压比时程曲线

Fig.5 Time-history curve of dynamic pore water pressure of soil

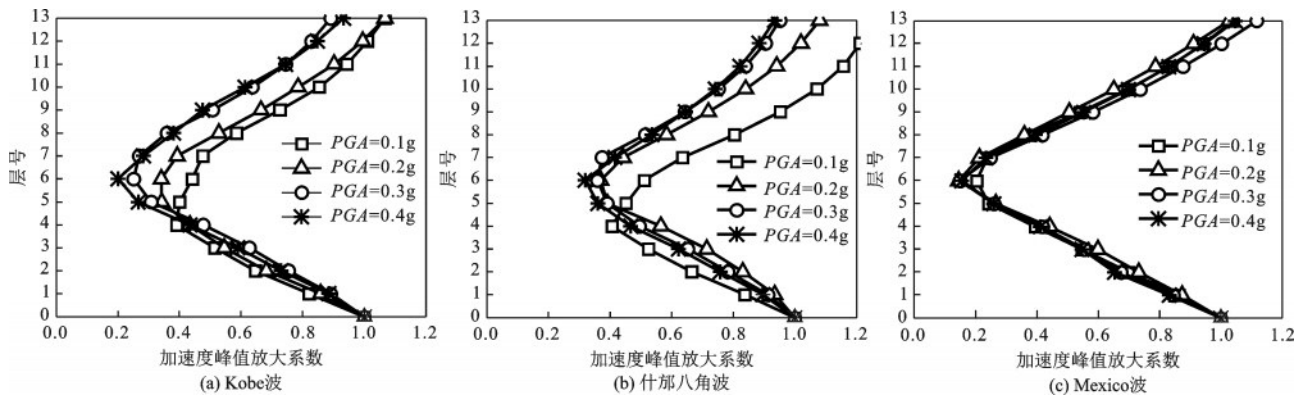


图6 结构加速度反应

Fig.6 Acceleration response of structure

动峰值为0.4g时,楼层加速度峰值放大系数有所降低,但仍高于输入地震动峰值为0.1g、0.2g时的加速度峰值放大系数。由前文分析可知,随着输入地震动峰值的增大,地基液化愈发显著,表明在近场地震动作用下液化场地上隔震结构仍有较好的隔震效果;而在远场强震下,隔震结构上部楼层的隔震效果明显降低,而下部楼层的隔震效果较好。

2.3 隔震层振动特性分析

表5给出隔震层顶底板处加速度反应峰值的

变化比即隔震效率(加速度差值除以底板处加速度峰值),在近场地震动(Kobe波、什那八角波)作用下,输入峰值加速度0.1g和0.2g时,隔震效率较高,随着地基液化程度不断加深,即使完全液化后,仍能减小约45%的加速度反应峰值;在远场地震动(Mexico波)作用下,0.1g时隔震效率尚可,但随着场地液化的加剧,隔震效率大幅下降,不足40%,隔震效果较差。总体来看,近场地震动(Kobe波、什那八角波)作用时液化场地上隔震结构隔震层的隔震效率明显高于远场地震动(Mexico波)

表5 隔震层顶底的加速度峰值

PGA	Kobe波			什邡八角波			Mexico波		
	底部	顶部	峰值变化比	底部	顶部	峰值变化比	底部	顶部	峰值变化比
0.1g	2.237	0.483	0.784	1.805	0.461	0.744	2.281	0.977	0.572
0.2g	2.270	0.909	0.600	2.768	1.054	0.619	2.482	1.683	0.322
0.3g	3.134	1.575	0.497	3.449	1.598	0.536	3.220	1.961	0.391
0.4g	3.412	1.916	0.439	3.667	1.969	0.463	3.807	2.348	0.383

作用时的隔震效率,这与本文2.2节的分析结果相吻合。

为了进一步说明隔震层对隔震支座底部输入地震动的“滤波”效应,图7给出了隔震层顶部及底部加速度反应谱的对比。由2.1节的分析可知:当输入峰值加速度从0.1g增大到0.3g时,地基液化范围不断扩大,图7相应的隔震层顶部的加速度反应谱也随之变化。当地基大范围液化后(输入峰值加速度为0.3g和0.4g),隔震层顶部加速度反应谱值基本不变,表明地基液化情况不同对隔震层顶部的加速度反应谱有影响。进一步分析图7可知,随近场地震动(Kobe波、什邡八角波)输入峰值的不断增大,隔震层顶部加速度反应的特征周期较隔震层底部加速度反应的特征周期明显延长,隔震层地震反应的特征周期向长周期转变,符合隔震层的工作原理;然而,随远场地震动(Mexico波)输入峰值的不断增大,隔震层顶部加速度反应的特征周期较隔震层底部加速度反应的特征周期减小,隔震层地震反应的特征周期向短周期移动。上述分析表明:地基液化影响隔震层的“滤波”效应,近场地震动作用下地基液化对隔震层的“滤波”效应影响较小,隔震层顶部加速度反应的特征周期明显延长,符合隔震层的工作原理;而远场地震动作用下地基液化对隔震层的“滤波”效应影响较大,隔震层顶部加速度反应的特征周期向短周期移动。

2.4 结构层间位移反应分析

由于ABAQUS软件中缺乏实体的隔震支座单元,无法考察支座本身的强度等参数,故将隔震层的位移反应作为衡量支座工作状态是否正常的指标。图8为结构分别在Kobe波、什邡八角波和Mexico波作用下的层间位移,其中层号0为隔震层。在三种不同地震波的作用下,层间位移的变化特征相似,以底部隔震层位移较大,上部结构各层位移较小,呈现整体平动的特点。由图8可以看出,在近场地震动

Kobe波、什邡八角波作用下,隔震层及上部结构的层间位移随输入地震动峰值的增大而增大,隔震层层间位移的增幅较大,但隔震层最大层间位移均没有超出隔震支座459 mm的容许水平位移。然而,在远场地震动Mexico波作用下隔震层层间位移的增幅显著,隔震层层间位移反应较Kobe波、什邡八角波作用时明显增大,Mexico波大震($PGA=0.4g$)作用时,层间位移达到602.9 mm,超出隔震支座459 mm的容许水平位移,可导致隔震支座失稳或强度破坏。上述分析表明:远场强震作用下液化场地上隔震结构的隔震层位移显著增大,可能超出隔震支座的容许位移导致隔震支座失稳或强度破坏,设计时应特别注意。

3 结论

(1)隔震结构下部桩基础能够有效的提高周围地基的抗液化能力,基础正下方地基土未发生液化现象,进而保证隔震结构的整体稳定性。

(2)地基液化影响隔震层的“滤波”效应,近场地震动作用下地基液化对隔震层的“滤波”效应影响较小,隔震层顶部加速度反应的特征周期明显延长,符合隔震层的工作原理;而远场地震动作用下地基液化对隔震层的“滤波”效应影响较大,隔震层顶部加速度反应的特征周期向短周期移动。

(3)液化场地上隔震结构的隔震效果与输入地震动的特性相关,近场地震动作用下,隔震结构整体上仍有较好的隔震效果;而在远场强震作用下,隔震结构下部楼层隔震效果较好,上部楼层隔震效果较差,强震下部分上部楼层出现加速度放大系数大于1,设计时应予以重视。

(4)地基液化对隔震结构的隔震层位移有显著影响,其中远场强震作用下隔震层位移显著增大,可能超出隔震支座的容许位移导致隔震支座失稳或强度破坏,设计时应特别注意。

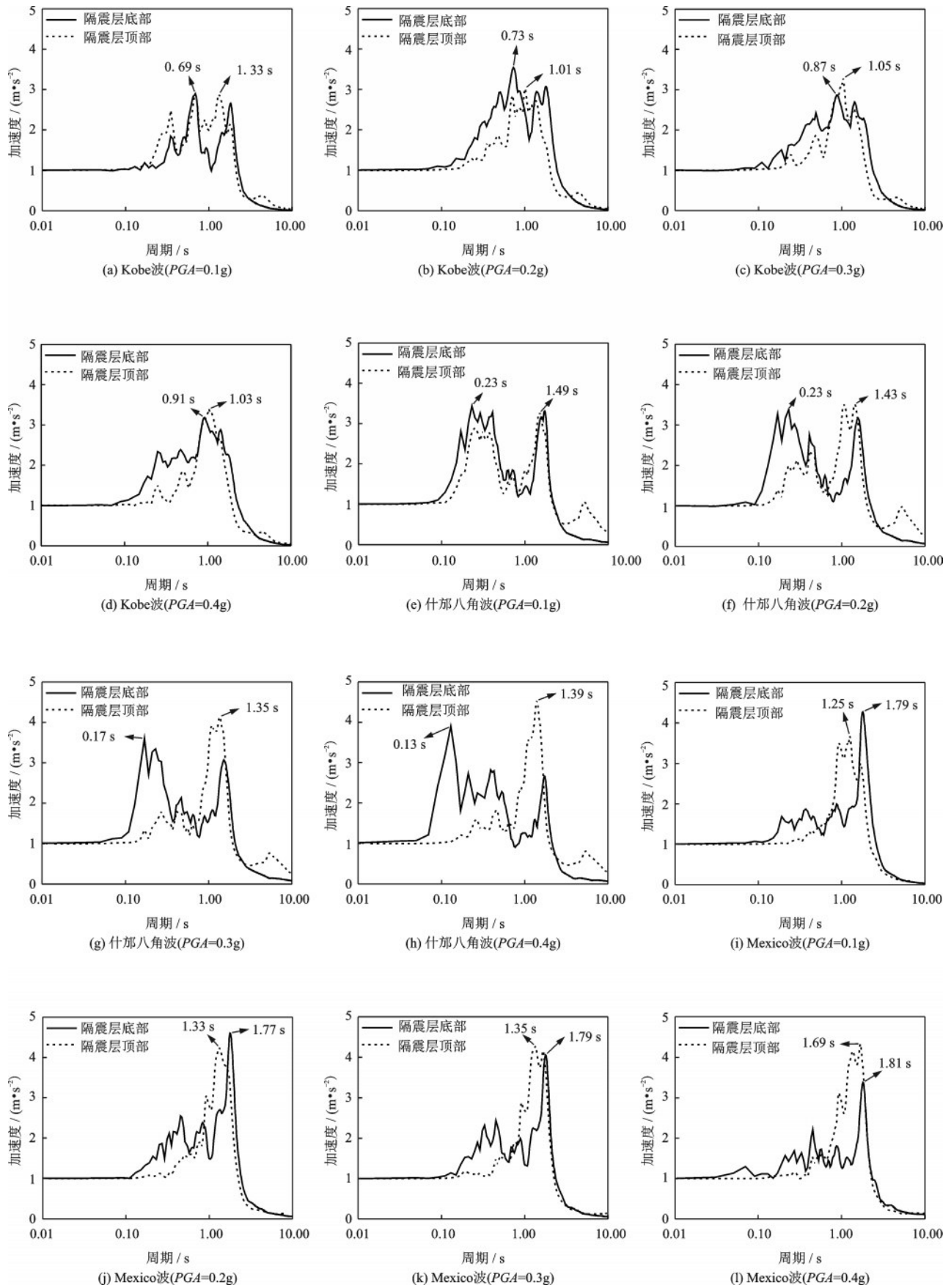


图7 隔震层加速度反应谱

Fig.7 Acceleration response spectrum of the isolation layer

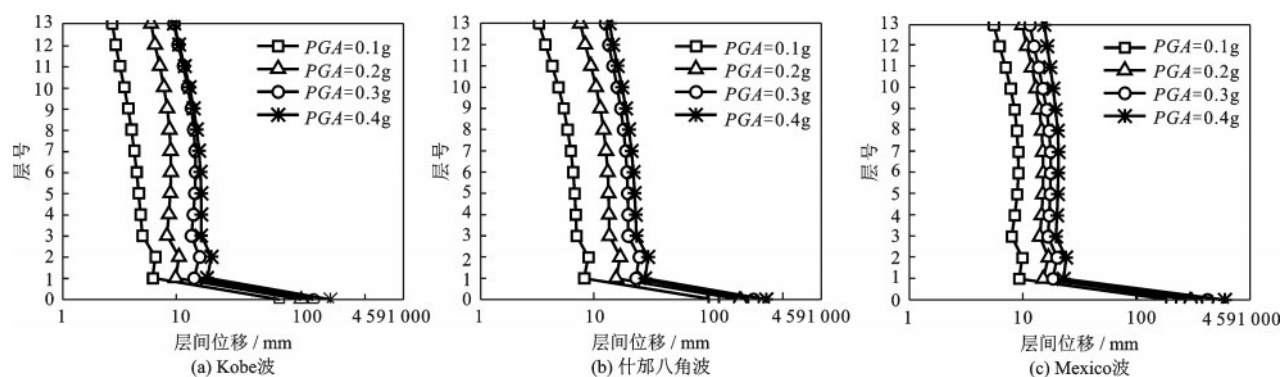


图8 结构层间位移反应

Fig.8 Layer displacement of structure

参考文献:

- [1] 马宗晋,杜品仁,高祥林,等. 东亚与全球地震分布分析[J]. 地学前缘,2010,17(5):215-233.
Ma Z J, Du P R, Gao X L, et al. Analysis of earthquake distributions in East Asia and in the world[J]. Earth Science Frontiers,2010, 17(5):215-233.(in Chinese)
- [2] 朱宏平,周方圆,袁涌. 建筑隔震结构研究进展与分析[J]. 工程力学,2014(3):1-10
Zhu H P, Zhou F Y, Yuan Y. Development and analysis of the research on base isolated structures[J]. Engineering Mechanics, 2014(3):1-10.(in Chinese)
- [3] 邓长根,曾苗,徐志根. 结构工程竖向隔震技术研究进展[J]. 建筑科学与工程学报,2019,36(4):1-10
Deng C G, Zeng M, Xu Z G. Progress of research on vertical isolation technology in structural engineering [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019,36(4): 1-10. (in Chinese)
- [4] 王志华,周恩全,徐超. 土体液化大变形研究进展与讨论[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2012, 34(5): 143-148.
Wang Z H, Zhou E Q, Xu C. Advance and discussion on liquefaction-induced large deformation of soil [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 34(5): 143-148.(in Chinese)
- [5] 中国地震局工程力学研究所“强震及工程震害资料基础数据库”项目组.“强震及工程震害资料基础数据库”建成[J]. 世界地震工程,2003(4): 22.
Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration "Basic Database of Strong Earthquake and Engineering Damage Information" project team. Basic database of strong earthquake and engineering damage information completed[J]. World Earthquake Engineering, 2003(4): 22.(in Chinese)
- [6] 郭迅. 汶川大地震震害特点与成因分析[J]. 地震工程与工程振动,2009,29(6):74-87.
Guo X. Characteristics and mechanism analysis of great Wenchuan earthquake [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2009, 29(6): 74-87. (in Chinese)
- [7] Giona B M, Villamor P, Almond P, et al. Associations between sediment architecture and liquefaction susceptibility in fluvial settings: The 2010-2011 Canterbury Earthquake Sequence, New Zealand [J]. Engineering Geology,2018,237:181-197.
- [8] 曹振中,侯龙清,袁晓铭,等. 汶川8.0级地震液化震害及特征[J]. 岩土力学,2010, 31(11):3549-3555.
Cao Z Z, Hou L Q, Yuan X M, et al. Characteristics of liquefaction-induced damages during Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3549-3555.(in Chinese)
- [9] 于旭,朱超,庄海洋. 不同场地上多层基础隔震结构振动台试验对比研究[J]. 防灾减灾工程学报,2016, 36(5):758-765.
Yu X, Zhu C, Zhuang H Y. Seismic responses of a base isolated multi-story structure with different soil foundations by the shaking table tests[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(5): 758-765.(in Chinese)
- [10] 刘伟庆,王曙光,林勇. 宿迁市人防指挥大楼隔震设计方法研究[J]. 建筑结构学报,2005(2): 81-86.
Liu W Q, Wang S G, Lin Y. Research on the design method of base-isolated structure of Suqian Renfang Zhihui Building [J]. Journal of Building Structures, 2005(2): 81-86.(in Chinese)
- [11] 楼梦麟,陈清军. 侧向边界对桩基地震反应影响的研究[M]. 上海:同济大学,1999.
Lou M L, Chen Q J. Influence of lateral boundary on seismic response of pile foundation [M]. Shanghai: Tongji University, 1999.

- Tongji University, 1999.(in Chinese)
- [12] 庄海洋,陈国兴. 砂土液化大变形本构模型及在 ABAQUS 软件上的实现[J]. 世界地震工程, 2011, 27(2):45-50.
Zhuang H Y, Chen G X. Constitutive method for large liquefaction deformation of sand and its implementation in ABAQUS software[J]. World Earthquake Engineering, 2011,27(2): 45-50.(in Chinese)
- [13] ABAQUS[CP]. Theory Manual Version 6.9. H.K.S. 2009.
- [14] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [15] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京:科学出版社, 2007.
Chen G X. Geotechnical Earthquake Engineering [M]. Beijing:Science Press, 2007.(in Chinese)
- [16] 庄海洋,陈国兴,朱定华. 土体动力粘塑性记忆型嵌套面本构模型及其验证[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10):1267-1272.
Zhuang H Y, Chen G X, Zhu D H. Dynamic visco-plastic memorial nested yield surface model of soil and its verification [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1267-1272.(in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 贺拥军,郭文豪. 圆柱面巨型网格结构的粘滞阻尼器减震研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(2): 230-236.
He Y J, Guo W H. Study on vibration reduction of cylindrical reticulated mega-structures with viscous dampers[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation, 2017, 37(2): 230-236. (in Chinese)
- [19] 于旭,朱超,庄海洋,等. 软夹层场地隔震结构动力特性试验与数值计算对比分析[J]. 南京航空航天大学学报,2016,48(4):590-597.
Yu X, Zhu C, Zhuang H Y, et al. Result comparison between experiment and numerical simulation for base isolated structure on soil ground [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(4): 590-597. (in Chinese)
- [20] 刘伟庆,李昌平,王曙光,等. 不同土性地基上高层隔震结构振动台试验对比研究[J]. 振动与冲击,2013,32(16):128-133,151.
Liu W Q, Li C P, Wang S G, et al. Comparative study on highrise isolated structure founded on various soil foundations by using shaking table tests [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(16): 128-133, 151.(in Chinese)

(本文责编:苏泽云)



(上接第 141 页)

- Li G, Zhang T H, Dong Z Q. Effect of long-link EBF mechanism on seismic performance of steel CBF [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 10-17. (in Chinese)
- [13] Li G, Dong Z Q, Li H N. Simplified collapse prevention evaluation for the reserve system of low-ductility steel concentrically braced frames [J]. Journal of Structural Engineering-ASCE, 2018, 144(7): 04018071.
- [14] Li G, Dong Z Q, Li H N, et al. Seismic collapse analysis of concentrically-braced frames by the IDA method [J]. Advanced Steel Construction, 2017, 13(3): 273-293.
- [15] 董志骞. 基于能力储备的中心支撑钢框架结构抗震性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
Dong Z Q. Seismic study on steel concentrically braced frames based on reserve capacity [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [16] Tremblay R, Filiatrault A, Timler P, et al. Performance of steel structures during the 1994 Northridge earthquake [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(2): 338-360.
- [17] Tremblay R, Filiatrault A, Bruneau M, et al. Seismic design of steel buildings: lessons from the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 23(3): 727-756.
- [18] 崔鸿超. 日本兵库县南部地震震害综述[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(1): 2-13.
Cui H C. Summary of earthquake damage in southern Hyogo, Japan [J]. Journal of Building Structures, 1996, 17(1): 2-13. (in Chinese)
- [19] Okazaki T, Lignos D G, Midorikawa M, et al. Damage to steel buildings observed after the 2011 tohoku-oki earthquake [J]. Earthquake Spectra, 2013, 29(S1): S219-S243.
- [20] 乔普拉(Chopra A K)著. 结构动力学:理论及其在地震工程中的应用(美)[M]. 谢礼立,吕大刚,等译. 北京:高等教育出版社, 2007.
- [21] FEMA, Quantification of building seismic performance factors [R]. FEMA P695. Redwood City, CA: Applied Technology Council, 2009.