

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201907054

软土地基-浅基础体系地震反应数值分析*

田兆阳^{1,2}, 李平¹, 张宇东¹, 辜俊儒¹

(1. 防灾科技学院, 河北三河 065201; 2. 山东省地震局, 山东济南 250014)

摘要: 软土地基中的天然地基浅基础在强震作用下易产生失稳及震陷等破坏, 在设计过程中充分考虑并利用其土结相互作用的影响, 可以有效提高体系的抗震性能。基于 OpenSees 有限元计算平台, 建立包含土结接触面的软土地基-浅基础二维平面应变模型, 计算分析了不同地震动输入和基础上部荷载对体系地震动、基础震陷量和基底反力分布的影响, 结果表明: 强震作用下软土地基对地震动的放大作用减弱, 但会产生大变形, 因此抗震设计的重点应着眼于地基基础的大变形; 上覆荷载大小对最终震陷值和震陷范围影响显著, 而未改变震陷曲线间的相对形态; 地震动能量的累积时间及累积速率影响软土地基-浅基础体系震陷的发展, 抗震分析中应考虑场地设计地震动的有效持时和阿里亚斯强度; 采用碎石桩等加固措施可改变基底压力分布形态, 从而有效的提高体系的抗震性能。

关键词: 软土地基; 浅基础; OpenSees; 抗震性能; 数值模拟

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1228-10

Numerical Analysis on Seismic Response of Soft Soil-Shallow Foundation System

TIAN Zhaoyang^{1,2}, LI Ping¹, ZHANG Yudong¹, GU Junru¹

(1. Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Sanhe 065201, China;

2. Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, China)

Abstract: Shallow foundation on natural soft soil is susceptible to seismic hazards like instability and settlement under intensive earthquake. Considering the impact of soil-structure interaction in the design process could have a positive impact on the seismic resistance of the system. This paper aims to investigate the seismic performance of the soft soil-shallow foundation system using numerical simulation method. Based on the OpenSees program, a 2-D plane-strain soft soil-shallow foundation system model containing soil-structure interface was established, and dynamic analyses with various input ground motions and upper loads were conducted. The seismic response, foundation seismic settlement, subgrade reaction under all calculated conditions were obtained and compared. The simulation result shows that: 1. The amplification coefficient in soft soil weakens under strong motion, the emphasis of

* 收稿日期: 2019-07-19; 修回日期: 2019-10-24

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH20084)、河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室开放基金项目(FZ213207)资助

作者简介: 田兆阳(1993—), 男, 工程师, 硕士。主要从事场地效应及岩土工程抗震等方面的研究。

E-mail: tzy_eqsd@foxmail.com

通讯作者: 李平(1981—), 男, 教授, 博士。主要从事场地效应及岩土工程抗震等方面的研究。

E-mail: chinaliping1981@126.com

earthquake resistant design should aim to control the large deformation. 2.Upper loads have a significant influence on the final subsidence and the settlement area instead of the relative shape of the settlement curves. 3.The seismic settlement of soft soil-shallow foundation system relates to the accumulation time and rate of ground motion energy, which can be reflected in the effective duration and Arias intensity of the design ground motion. 4.Pertinence reinforcement methods in foundation soil like stone columns can change the distribution forms of subgrade reaction and improve seismic performance of the soft soil-shallow foundation system.

Keywords: soft soil; shallow foundation; OpenSees; seismic performance; numerical simulation

引 言

震害调查发现,我国在历次地震中出现的地基基础震害主要表现为天然地基浅基础的破坏,其中大量位于软土分布区,软土地基-浅基础体系在地震作用下产生的失稳、震陷等灾害都曾造成了严重的经济损失^[1]。例如1976年唐山地震中天津地区软土地基上的部分建筑物产生明显地震附加沉降^[2],2008年汶川地震中汉旺镇建在软土地基上的砖柱结构房屋产生不均匀沉降导致上部结构破坏^[3]。随着对于浅基础抗震性能研究的深入,发现如果考虑地震作用下土-结构相互作用的影响,允许浅基础在地震作用下产生摇摆或根据地基本体的地震反应特点进行针对性加固,其表现出的隔震和耗能特性可有效减轻地基与基础的损伤破坏,进而提升结构体系的抗震能力和震后修复效率^[4-6]。

目前,国内外学者在此方面的研究主要集中在试验研究和数值模拟两个方面。试验研究主要是利用大型土工离心机(L. Deng等^[7],周燕国等^[8]),其对发现土-结构相互作用新现象、新规律起到重要作用,但是在实施过程中对人力、物力的要求较高,因此在应用上受到了一定的限制。数值模拟方法可以克服以上缺点,并且随着材料本构模型和计算机技术的发展,该方法在土结相互作用研究中得到了更加广泛的应用。R. Nova等^[9]、C. Cremer等^[10]、R. Paolucci等^[11]在浅基础沉降分析中采用宏单元来模拟地基-基础接触面,研究了竖向、水平以及动力荷载下地基的塑形变形、基础抬升和地基基础相互作用等问题。另外一种更加符合实际的方式是采用有限元单元直接建立地基-基础接触面模型,以考虑二者在接触面上发生的复杂相互作用。W. Liu等^[12]利用二维平面应变模型对碎石桩加固摇摆浅

基础体系进行计算,对影响加固特性的因素进行了参数敏感性分析,但未考虑不同地震动作用的影响。在已取得的研究成果中,地基土层主要为砂土,对于软土地基-浅基础体系的研究较少;数值模型对土-结构间接触关系的简化过多,较难反映接触面上分离与滑移等非连续状态;动力加载方面,缺少对真实地震动频谱特性等因素的考虑。因此,探究实际地震作用下的软土地基和浅基础体系的相互作用,分析不同因素对其地震反应的影响,对软土地基基础抗震研究具有重要意义。

为此,本文基于OpenSees有限元软件,以软土地基-浅基础体系为研究对象,建立二维平面应变模型,对软土地基-浅基础体系进行动力反应分析计算,研究了不同地震动输入和基础上部荷载对体系地震动响应、基础震陷量和基底反力分布的影响,可为软土地基-浅基础抗震研究为提供参考。

1 数值模型

1.1 数值模拟方法

在地基-浅基础体系中,地基土与上部结构在接触面上发生力的传递并达到变形的协调。本文采用整体分析方法来研究体系的地震动响应,直接对土体及上部结构进行建模,一次分析就可完成求解,并同时确定出土体和结构的运动。该方法可以考虑更复杂的土体本构关系,反映土结接触面上分离滑移等非连续状态等,更加适用于软土地基-浅基础体系的地震反应分析。

OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation)是在地震工程学界广泛使用的有限元分析软件^[13]。其代码完全开放,材料库内容丰富,具有强大的非线性计算能力。程学磊等^[14]利

用该软件对多种工况下饱和软土自由场地大型振动台试验进行了模拟,计算结果与试验结果具备良好的 consistency,验证了 OpenSees 有限元模型在软土地震动反应分析方面的适用性和可靠性。

本文依托 OpenSees 计算平台,建立包含接触面的地基-基础体系二维平面应变模型,并选取符合基础、软土地基、接触面物理性质的本构模型、材料参数和人工边界条件,对不同上覆荷载及地震动输入情况下软土地基的地震动加速度响应、场地震陷量、基底反力分布进行了计算分析。

1.2 几何模型及单元选取

数值模型为由浅基础、软土地基及接触面单元组成的平面应变模型(图 1(a))。基础高度为 2 m,底面宽度为 2 m,软土地基尺寸为 20 m×10 m,为保证计算稳定性^[15],基底下部网格设置为 0.2 m×0.2 m,外部网格 0.4 m×0.2 m。软土地基采用四节点 *u-p* 流固耦合单元,基础采用弹性梁-柱单元,地基与基础之间设置接触面单元(图 1(b)),采用零长度单元连接地基节点与基础节点。模型共由 3 133 个节点,3 021 个单元组成。模型采用瑞利阻尼模拟能量的耗散,边界采用强制位移边界,即将两个侧面边界同一高度的水平向位移自由度绑定。地表为自由面,设置孔压为零,基底、侧面均设置为不透水边界。

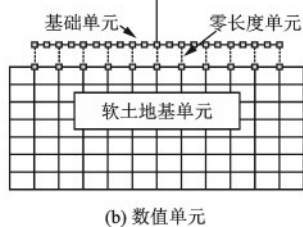
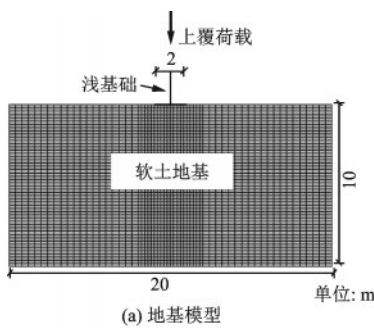


图 1 数值模型

Fig.1 Numerical model

1.3 材料本构模型

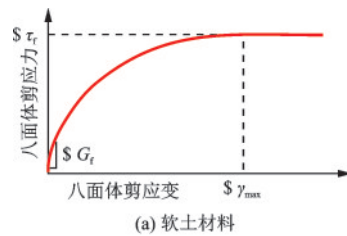
软土采用 OpenSees 中 Pressure Independent Multi Yield 材料模拟^[16-17]。该材料为一种多屈服面弹塑性材料,假定塑性只发生在偏应力—应变反应中,在体积应力—应变状态下只产生线弹性应力—应变响应,且与偏分量无关。在固结阶段,该材料为线弹性,动荷载分析阶段,材料的应力—应变反应呈现弹塑性,该材料的应力应变关系如图 2(a)所示。计算所采用的本构模型参数根据文献[18]中天津地区典型软土地基淤泥质软土静动力学试验选取(表 1)。

接触面零长度单元采用 Elastic-No Tension uniaxial^[19]材料模拟,设置材料轴向受压刚度较大,受拉刚度为零(图 2(b)),允许地基基础接触面脱开。

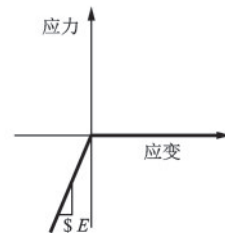
表 1 软土本构模型参数

Table 1 Constitutive model parameters of soft soil

参数	数值
密度/(ton·m ⁻³)	1.8
低应变剪切模量/kPa	1.5×10 ⁴
体积模量/kPa	6.5×10 ⁴
黏聚力/kPa	30
峰值剪应变	0.1
摩擦角/(°)	0
参考围压/kPa	100
压力相关系数	0



(a) 软土材料



(b) 接触面材料

图 2 材料应力应变关系

Fig.2 Stress—strain relationship of model materials

1.4 输入地震动

为充分考虑地震动的峰值、频谱、持时等因素对体系动力响应的影响,计算中采用三条天然强震记录进行调幅作为输入地震动。第一条为1992年Landers(M_w 7.3)地震中Joshua Tree台站的强震记录,该条强震记录具有持时较长,能量积累过程较慢的特点;第二条为1994年Northridge(M_w 6.7)地震中Newhall—WPC台站的强震记录,该条地震动为近断层记录,具有明显的速度脉冲;第三条为1995年Kobe(M_w 6.9)地震中Takatori台站的记录,该条记录具有能量积累较快的特点。Landers地震动分

别调幅0.05g、0.1g、0.2g、0.4g进行输入, Northridge地震及Kobe地震调幅为0.2g输入。表2给出了输入地震动的有效持时(能量5%~95%),卓越周期,阿里亚斯强度 I_a 等。

图3给出了三条地震动在峰值为0.2g下的时程、加速度反应谱、傅里叶幅值谱及阿里亚斯强度时程。从输入地震动的傅里叶幅值谱(图3(c))可以看出, Landers地震动和Kobe地震动的谱上都有明显的峰值,主峰突出,能量分别集中在1.34 Hz和0.76 Hz; Northridge地震动主峰不明显,频带较宽且低频部分能量较大。

表2 输入地震动参数

Table 2 Basic parameters of input earthquake motions

名称	输入持时/s	有效持时/s	PGA/g	反应谱卓越周期/s	傅里叶谱卓越频率/Hz	$I_a/(m \cdot s^{-1})$
Landers	80	26.84	0.05	0.72	1.34	0.032 1
Landers	80	26.84	0.1	0.72	1.34	0.128 4
Landers	80	26.84	0.2	0.72	1.34	0.513 6
Landers	80	26.84	0.4	0.72	1.34	2.054 5
Northridge	80	16.31	0.2	0.48	0.76	0.318 6
Kobe	80	11.74	0.2	0.37, 1.15	0.82	0.480 8

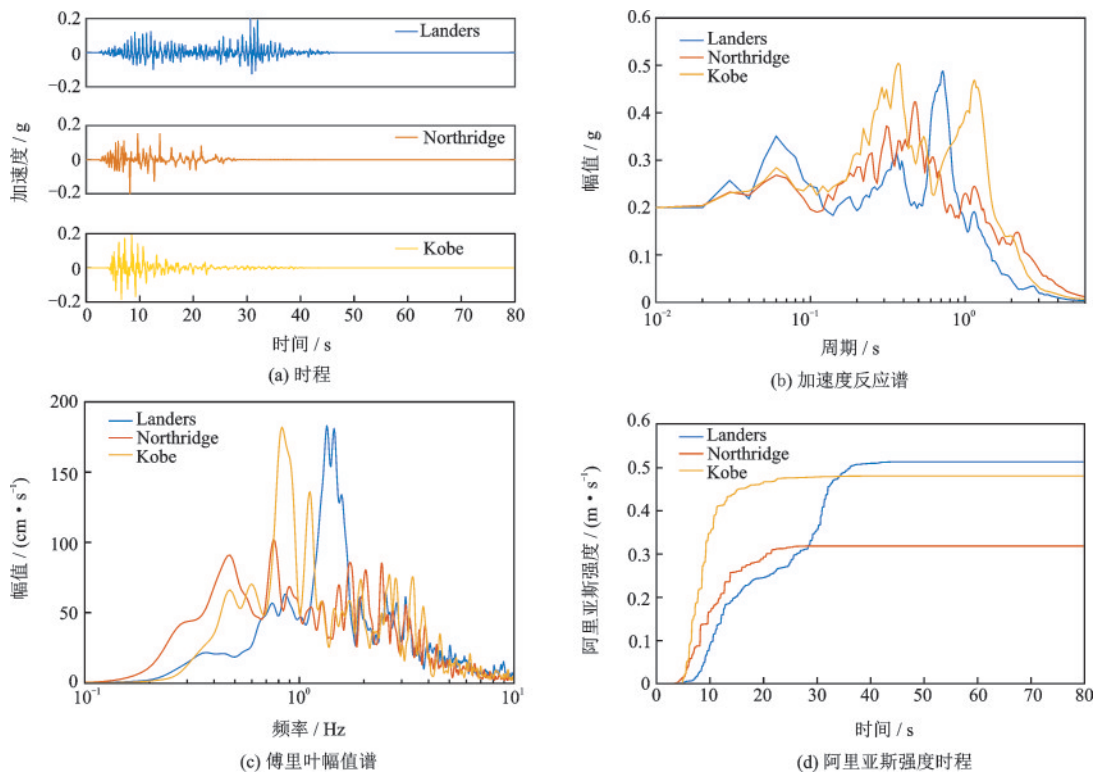


图3 输入地震动

Fig.3 Input earthquake motions

2 计算结果分析

根据上述数值模型,设计 50、100、150 kN 三种不同大小的上覆荷载,计算了不同频谱、峰值的地震动输入及上覆荷载下软土地场地的地震动响应、场地地震陷量及基底反力分布情况。模型采用 Rayleigh 阻尼,阻尼比设置为 5%,计算过程中首先施加地基土的自重应力,再施加上部结构荷载,采用基底一致激励的方式进行地震动输入。

2.1 地震动响应

2.1.1 峰值加速度放大

图 4 为不同上覆荷载下模型土体的加速度峰值

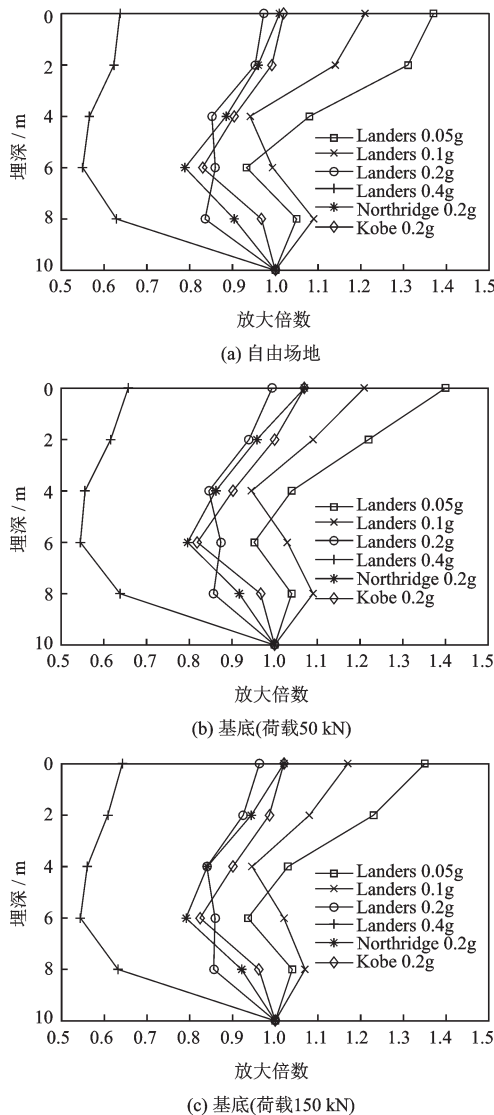


图 4 土层不同埋深处加速度放大作用

Fig.4 Acceleration amplification coefficient along depth

放大系数随埋深的分布。在 Landers 地震动作用下,自埋深 8 m 处起,加速度放大系数随埋深的减小先减小后增大,峰值出现在地表处;随输入峰值增加,各深度处放大系数显著减小。当输入峰值为 0.2g 时,Landers 相比 Northridge 及 Kobe 的放大系数随埋深变化曲线形态及最小放大系数位置有区别,地表放大系数小于后两者。

上部基础及荷载对加速度峰值的放大作用有所影响。由于文章篇幅限制,给出自由场地、荷载 50 kN 及 150 kN 给出地表处峰值加速度放大倍数随输入地震动的变化统计情况(图 5)。随输入地震动峰值的增加,地表峰值加速度放大倍数呈线性减小趋势;随着上部荷载的增加,直线斜率的绝对值有所减小,土体对地震动峰值的放大作用减弱。

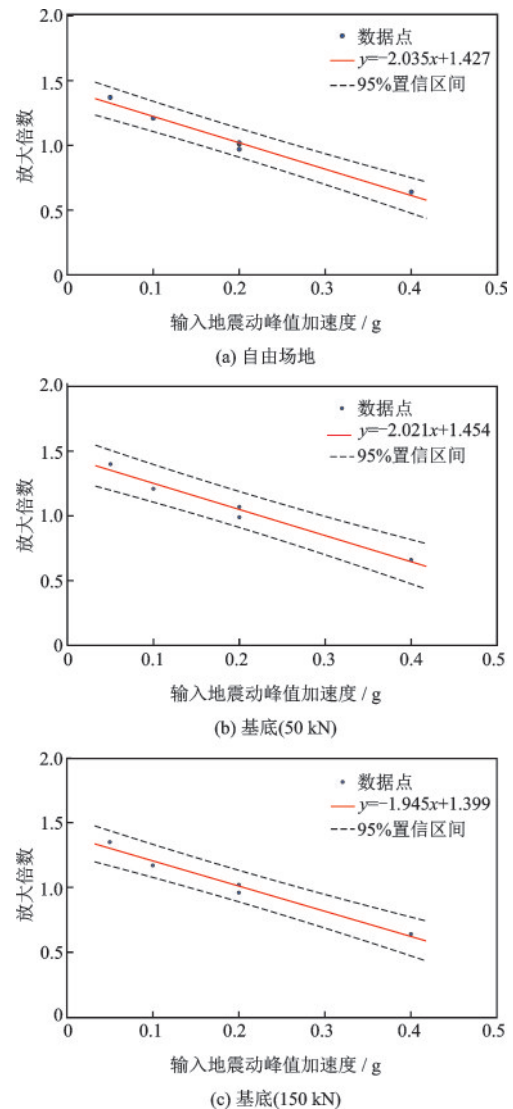


图 5 地表处峰值加速度放大倍数

Fig.5 Acceleration amplification coefficient at ground surface

2.1.2 归一化加速度反应谱

为突出频谱特性的影响,给出自由场地和基础处地震动的放大系数谱(β 谱)(图6、图7)。

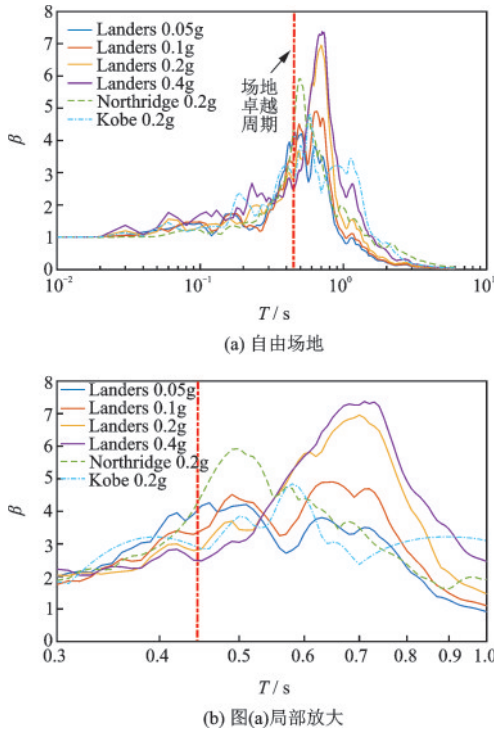


图6 自由场地地表处 β 谱

Fig.6 Normalized acceleration response spectra at free site surface

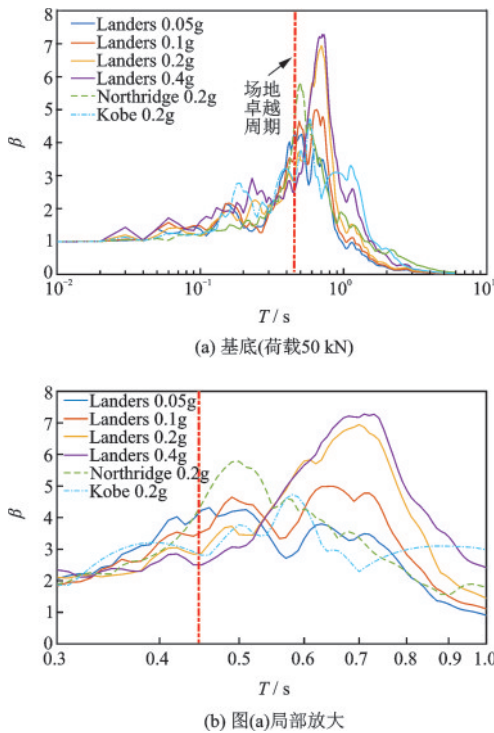


图7 基底地表处 β 谱

Fig.7 Normalized acceleration response spectra at foundation base surface

根据土体本构参数计算,模型中土场地的卓越周期约为0.44 s。Landers地震动的卓越周期为0.72 s,当其输入峰值为0.05g、0.1g时, β 谱的主要放大周期为0.4 s~0.6 s,与场地卓越周期接近,且谱的形状呈现多峰型,放大周期段较宽;随着输入峰值增大,地表 β 谱卓越周期增大并与输入地震动接近,场地卓越周期附近放大效应减弱,谱的形态为尖峰型;说明在输入地震动强度较小时,土层放大效应表现为对场地卓越周期附近分量的放大,强度较大时,土层反应的放大周期受输入地震动的控制。

当输入峰值为0.2g时,地表 β 谱的峰值及放大频段有所不同。 β 谱峰值Landers>Northridge>Kobe,卓越周期分别为0.7、0.5、0.6 s,反应了持时及频谱特性对场地反应的影响。Landers有效持时最长,地表 β 谱的卓越周期离场地卓越周期较远;Northridge卓越周期与场地卓越周期差距最小,地表 β 谱的卓越周期也在场地卓越周期附近。对Landers的放大作用主要受其有效持时的影响,对Northridge的放大作用主要受其地震动频谱的影响。可见有效持时是影响场地响应的重要因素,其作用大于频段相近引起的共振效应,而Kobe的反应谱卓越周期远离场地卓越周期且有效持时较短,因此场地对其放大作用最弱。

对比自由场地地震反应(图6)与基础底部场地(图7) β 谱,可见两者在谱的形状与谱值方面相似同时也存在细微的差异,以上覆荷载50 kN的工况为例,输入地震动大于0.1g时基底场地的放大系数略小于自由场地。值得说明的是,计算未考虑竖向地震动的影响,后续可开展专门研究。

2.2 场地震陷量

2.2.1 基底竖向位移反应

在地震荷载作用下,软土的永久变形会造成上部结构的沉降及破坏。为探究地基基础发生震陷破坏的过程,图8给出了上覆荷载为100 kN时,三种峰值加速度为0.2g的地震动作用下基础底面中心点的水平向与竖向位移间关系。基础下的土体在此过程中均产生了一定的变形,竖向位移幅值和速率的发展受水平向地震动作用的控制,随水平地震动幅值的增加而增加,地震动强度降低时竖向位移发展也随之减缓。三条地震动中,Landers(图8(a))与Northridge(图8(b))、Kobe(图8(c))相比具有较长的有效持时及第二次能量释放段(图3)。

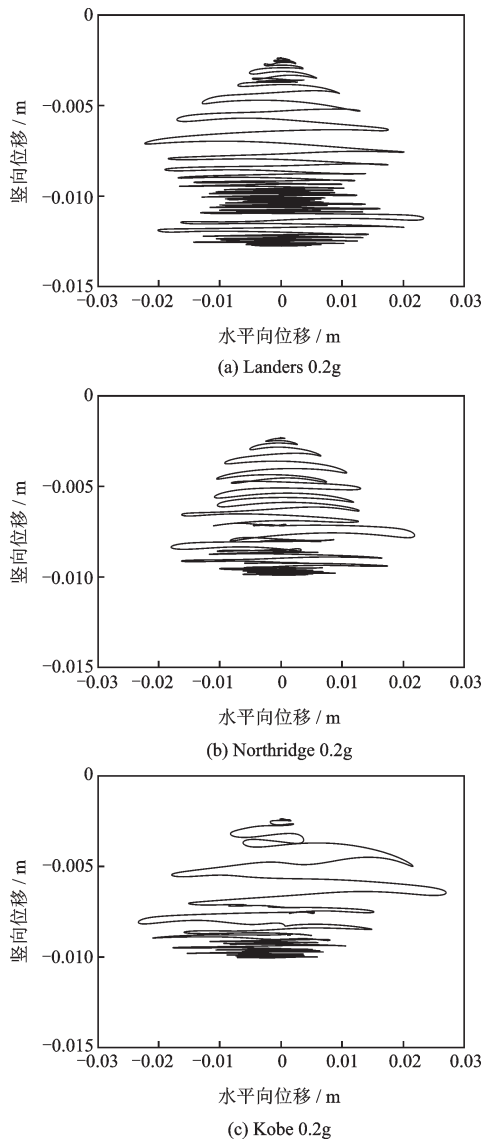


图8 基底竖向位移反应

Fig.8 Vertical displacement reaction at foundation base

根据这种能量释放特点将震陷过程分为两阶段,在第一阶段中,三种情况下土体随地震动引起的水平位移均产生了震陷,最终震陷量在0.01 m左右;Kobe(图8(c))地震动在此阶段引起的震陷发展最快,这与其在三者中能量累积速率最快有关。随后,Landers地震动又引起了土体的第二阶段震陷,此时震陷量随水平位移的发展速率及最终值与第一阶段相比有所减小。震陷量最终发展至0.013 m左右且在地震动作用减小时停止,且在上覆荷载作用下未再产生较大变化,说明土体仍然具有一定的承载力。

2.2.2 上覆荷载对震陷的影响

软土地基的最终震陷量受到上覆荷载的影响。图9给出了Landers地震动输入下基础上部荷载分

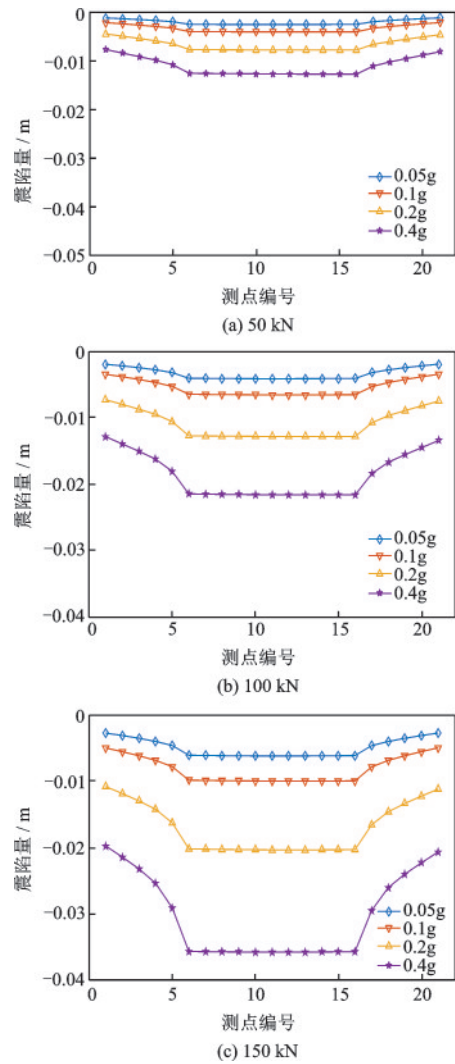


图9 不同上覆荷载下Landers地震动输入引起的表层震陷
Fig.9 Surface settlement under different upper loads in Landers earthquake

别为50、100、150 kN时基底表层土的最终沉降量,基底土层表面等距布设21个监测点,各点间距为0.2 m,11号点位于基础水平正中位置。从图中可见,在地基承载力尚未丧失的情况下基础荷载的增加对场地最终最大震陷量有显著的影响,放大倍数随荷载数值近似线性关系,并且在不同强度下大致相同。对比各震陷曲线的形状可见,上覆荷载的大小影响着震陷区域的大小,由于监测点设置限制本文未能得到具体影响范围,但基底两侧监测点的震陷值同样随上覆荷载的增加而增加,震陷范围也有随之增长的趋势。综上所述,上覆荷载对震陷曲线的影响主要体现在最终震陷值和震陷范围,并未改变各强度地震动震陷曲线间的相对形态。

2.2.3 地震动特性对震陷的影响

地震动特性对震陷的影响体现在强度、频谱、

持时等方面,选取阿里亚斯强度、加速度反应谱卓越周期、有效持时(能量5%~95%)作为衡量指标。图10给出了100 kN上部荷载下三种不同输入地震动引起的基底处表层土体的最终震陷量,监测点设置情况同图9、图11给出了峰值加速度为0.2g时监测点11的震陷时程。在输入地震动峰值加速度为0.05g及0.1g时,三者的最终震陷量近似;随着峰值加速度的增大,Landers地震动引起的震陷量相比其它两者明显增大,0.2g时Landers、Northridge、Kobe引起的最大震陷分别为0.013、0.010、0.010 m,0.4g时分别为0.022、0.016、0.017 m。

由上文可知,Landers有效持时较长,存在第二次的能量积累过程,地表输出的加速度反应谱幅值最大;Northridge阿里亚斯强度最小;Kobe地震动能

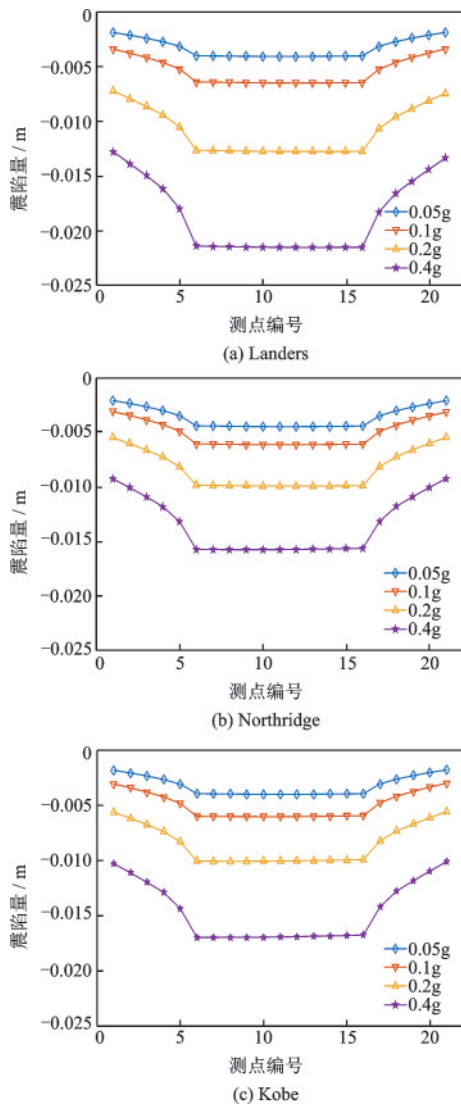


图10 不同地震动输入引起的表层震陷(100 kN)
Fig.10 Surface settlement under different earthquake motions (100 kN)

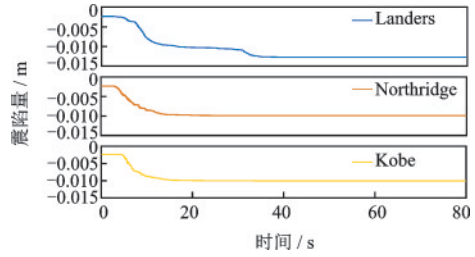


图11 不同地震动输入引起的表层震陷时程(100 kN,0.2g)
Fig.11 Surface settlement time history under different earthquake motions (100 kN,0.2g)

量积累较快,阿里亚斯强度与Landers近似。对比图3(d)、图10和图11可见,有效持时对震陷量的影响最明显,有效持时越长,震陷发展越充分,最终震陷量越大;地震动能量的累积速率直接影响震陷的发展速率,阿里亚斯强度上升速率越快的时段对应震陷速率也越快;从图10(a)、图10(c)可见,Landers地震动阿里亚斯强度虽与Kobe近似,但两者最终震陷量差异较大;频谱特性对震陷的影响则要综合考虑地震动加速度反应谱的卓越周期以及场地、上部结构的动力特性,最终可反应在地表的加速度反应谱上,一般情况下,地表加速度反应谱平台值越大,卓越周期越接近场地卓越周期,震陷量也就越大。而目前抗震设计规范^[20]中并未考虑地震动有效持时等因素对地基基础破坏所造成的影响,可能给建设在软土地场的建(构)筑物带来潜在危险。

2.3 基底压力

基底压力分布规律对土体应力计算及结构设计有着重要的影响。图12、图13给出了基础上部荷载为100 kN时Landers地震动作用下基底压力的分布图及峰值加速度0.2g下基底压力的变化时程。由图12可见,基底压力呈马鞍型分布,符合刚性基础在中心荷载作用下的特点;输入地震动峰值加速

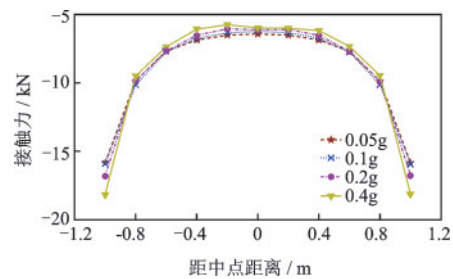


图12 基础底面最终压力分布(Landers, 100 kN)
Fig.12 Distribution forms of subgrade reaction(Landers, 100 kN)

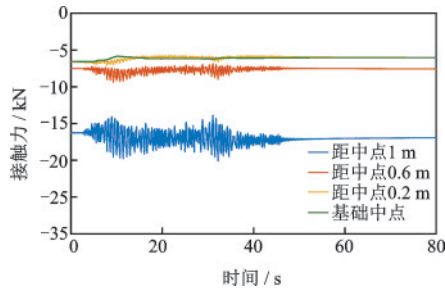


图 13 基础底面压力变化时程(Landers-0.2g, 100 kN)

Fig.13 Time history of subgrade reaction(Landers-0.2g, 100 kN)

度从 0.05g 增至 0.4g 过程中,基础两边缘的压力由 15.8 kN 增至 18.2 kN,增加 15%,基础中心两侧压力减小 15% 左右,基础所受弯矩增大。由图 13 可见,基础底面边缘处受地震动加载的影响最大,其压力值增加,变化幅值也最大;距基础中点越近部位基底压力变化越小,基础中点处压力值有所减小。

3 讨论

3.1 数值模拟方法

本文利用 OpenSees 建立数值模型,选取符合材料物理性质的本构模型、计算参数和边界条件,对不同上覆荷载及地震动输入下软土地地的加速度响应、震陷量、基底反力分布进行了计算分析。

研究表明,OpenSees 计算平台具有强大的非线性分析能力,适合用于强震作用下的土结相互作用问题计算;在本构模型及相关参数选取方面,PIMY 材料可以合理反应软土的应力—应变特性,对于软土地地地震动反应、软土震陷等问题可做到有效的模拟,但应特别注意在计算参数选取的合理性;在土结接触面的建模方面,零长度单元与 ENT 材料的组合可以反应土体与结构之间的相对滑移与分离,更加符合体系在真实条件下的复杂相互作用。

另外,本文在地震动输入上仅考虑了水平向输入,今后可在此基础上考虑竖向输入及水平竖向组合输入工况,进行更加深入精细的研究。

3.2 软土地基—浅基础体系抗震性能

历次地震中地基基础震害主要表现为天然地基浅基础的破坏,其中包括了大量的软土地基震

害。主要表现为土体大永久变形造成基础和上部建筑物的均匀或不均匀沉降。对软土地基基础抗震性能研究的主要方向应集中在:(1)软土地地中地基基础的震陷;(2)软土地基的抗震承载稳定性;(3)减轻地基基础震害的工程措施等。目前,天然地基浅基础的抗震设计仅进行简单的计算校核,未充分利用其潜在的抗震能力。本文针对以上问题,对软土地基浅基础的地震反应特性进行了研究,表明:(1)地震动特性对地基基础的震害有着重要的影响,震陷的发展与地震动能量的累积时间及累积速率有关;(2)地震动会使基底面边缘处的接触应力增大,造成基础底面的弯矩增加,基础应具有足够承载能力;(3)基于这种基底压力分布特点,在边缘处设置碎石桩等增强材料可以有效增加体系的抗震性能。

另外,本文仅对单一体系进行了计算分析,未考虑多个基础以及复杂场地条件下的不均匀震陷,今后应结合实际基础形式及土层结构系统研究。

4 结论

(1)弱震作用下,软土地地中抗震设计应重点考虑其对地震动的放大;强震作用下抗震设计的重点应着眼于地基基础的大变形(震陷)。

(2)在地基承载力尚未丧失的情况下,上覆荷载大小对震陷曲线的影响主要体现在最终震陷值和震陷范围,但并未改变不同强度地震动下震陷曲线间的相对形态。

(3)地震动有效持时对于震陷量的影响最为明显,有效持时越长,震陷发展越为充分,最终震陷量越大;地震动的能量累积速率越快,震陷的发展速率越快。

(4)浅基础在软土地基中的基底压力呈马鞍形分布,地震会使基础边缘部位接触力增大,在边缘采取碎石桩等加固措施可有效改善其抗震性能。

综上所述,探究软土—浅基础体系在地震作用下的动力反应规律并针对性选取抗震措施,对提升软土地基基础的抗震性能有着重要的意义。采用数值模拟方法可对该问题进行全过程分析,可针对典型基础参数和场地条件开展数值计算,并结合试验验证计算结果的有效性,科学合理给出抗震设计建议,最大程度的减轻地震风险。

参考文献:

- [1] 张克绪,凌贤长.岩土地震工程及工程振动[M].北京:科学出版社,2016.
Zhang K X, Ling X Zh. Geotechnical earthquake engineering and engineering vibration [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [2] 刘恢先.唐山大地震震害[M].北京:地震出版社,1986.
Liu H X. Tangshan earthquake damage [M]. Beijing: Earthquake Press, 1986. (in Chinese)
- [3] 江席苗.汶川地震地基基础震害调查研究[D].上海:同济大学,2009
Jiang X M. Investigation and research on earthquake damage of Wenchuan earthquake foundation [D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese)
- [4] Wiessing P R. Foundation rocking on sand [D]. Auckland: University of Auckland, School of Engineering, 1979.
- [5] Gajan S, Kutter B L. Capacity, settlement, and energy dissipation of shallow footings subjected to rocking [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(8): 1129-1141.
- [6] 杜修力,周雨龙,韩强,等.摇摆桥墩的研究综述[J].地震工程与工程振动,2018,38(5): 1-11.
Du X L, Zhou Y L, Han Q, et al. State-of-the-art on rocking piers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(5): 1-11. (in Chinese)
- [7] Deng L, Kutter B L, Kunnath S K. Centrifuge modeling of bridge systems designed for rocking foundations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(3): 335-344.
- [8] 周燕国,陈云敏,社本康广,等.软粘土地基上建筑物不均匀震陷离心机试验研究[J].中国科学,2009,39(6): 1129-1137.
Zhou Y G, Chen Y M, Shamoto Y, et al. Building on soft clay foundation uneven settlement centrifuge test research. [J]. Chinese Science, 2009, 39(6): 1129-1137. (in Chinese)
- [9] Nova R, Montrasio L. Settlements of shallow foundations on sand: geometrical effects [J]. Géotechnique, 1991, 41(2): 243-256.
- [10] Cremer C, Pecker A, Davenne L. Modelling of non-linear dynamic behaviour of a shallow strip foundation with macro-element [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2012, 6(2): 175-211.
- [11] Paolucci R, Shirato M, Yilmaz M T. Seismic behaviour of shallow foundations: shaking table experiments vs numerical modelling [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, 37(4): 577-595.
- [12] Liu W, Hutchinson T C. Numerical investigation of stone columns as a method for improving the performance of rocking foundation systems [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 106: 60-69.
- [13] McKenna F. OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation [J]. Computing in Science and Engineering, 2011, 13(4): 58-66.
- [14] 程学磊,崔春义,孙宗光,等.饱和软土自由场振动台试验与数值模拟对比[J].大连海事大学学报,2018,44(3): 88-94, 101.
Cheng X L, Cui Ch Y, Sun Z G, et al. Comparison between large-size shaking table test and numerical simulation for free field of saturated soft soil [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2018, 44(3): 88-94, 101. (in Chinese)
- [15] 廖振鹏.工程波动理论导论[M].北京:科学出版社,2002.
Liao Zh P. Introduction to wave motion theories in engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [16] Yang Z, Lu J, Elgamal A. OpenSees soil models and solid-fluid fully coupled elements user manual [J]. University of California, San Diego, 2008.
- [17] Yang Z. Numerical modeling of earthquake site response including dilation and liquefaction [D]. New York: Columbia University, 2000.
- [18] 田兆阳,李平,郑志华,等.软土动力特性动三轴试验研究[J].地震工程学报,2017,39(1): 95-99, 118.
Tian Zh Y, Li P, Zheng Zh H, et al. Dynamic triaxial tests on dynamic characteristics of soft soil [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1): 95-99, 118. (in Chinese)
- [19] Mazzoni S, McKenna F, Fenves G. Getting started with OpenSees [R]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2004.
- [20] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)