

辜俊儒,李平,田兆阳,等.基于 OpenSees 的地震动对软土震陷影响研究[J].地震工程学报,2019,41(5):1339-1346.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1339

GU Junru,LI Ping,TIAN Zhaoyang,et al.Influence of Ground Motions on Seismic Subsidence of Soft Soil Based on OpenSees [J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(5):1339-1346.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1339

基于 OpenSees 的地震动对软土震陷影响研究

辜俊儒^{1,2},李平¹,田兆阳^{1,3},周春澍¹,张 塬¹

(1. 防灾科技学院,河北 三河 065201; 2. 四川蜀通岩土公司,四川 成都 610000;

3. 山东省地震局,山东 济南 250014)

摘要:软土具有高灵敏度、低强度等特性,在地震过程中极易产生震陷。基于 OpenSees 数值模拟方法对软土场地的震陷反应进行非线性动力有限元分析,通过改变地震动峰值加速度、频谱特性、输入方式来研究其对软土震陷的影响。结果表明,地震动峰值加速度对地基土的不均匀震陷有显著影响,地震动峰值加速度越大,震陷量显著增大,震陷影响深度更大,对水平地表造成的破坏范围也更大;地震动频谱特性对软土震陷有重要影响,当地震动卓越频率与场地自振频率相近时,其幅值越大,产生的震陷越严重;水平、竖向同时输入地震动的方式能更好地反映土体的振动及震陷响应。该研究成果对探索软土震陷的机理有一定的指导意义。

关键词:地震动;软土;震陷;OpenSees;影响因素

中图分类号: TU471.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1339-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1339

Influence of Ground Motions on Seismic Subsidence of Soft Soil Based on OpenSees

GU Junru^{1,2}, LI Ping¹, TIAN Zhaoyang^{1,3}, ZHOU Chunshu¹, ZHANG Yuan¹

(1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China;

2. Sichuan Shutong Geotechnical Corporation, Chengdu 610000, Sichuan, China;

3. Earthquake Agency of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract: Soft soils have characteristics of high sensitivity and low strength and are easily subject to seismic subsidence during earthquakes. In this study, the nonlinear dynamic finite element analysis of the seismic subsidence response of soft soil site was performed based on the OpenSees numerical simulation method. The results show that the peak acceleration of ground motion has a significant effect on the uneven seismic subsidence of foundation soil. As the peak acceleration of ground motion increases, the amount of seismic subsidence, the impact depth of seismic subsidence, and the damage to the horizontal surface also increase. The characteristics of the ground motion spectrum have an important impact on the soft soil earthquake subsidence. If the predomi-

收稿日期: 2018-11-10

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金创新团队项目(ZY20160105);河北省青年拔尖人才计划特支经费支持

第一作者简介: 辜俊儒(1994-),男,硕士,助理工程师,主要研究岩土工程抗震。E-mail: gujr3211@foxmail.com。

通信作者: 李平(1981-),男,博士,副教授,主要从事岩土工程抗震研究。E-mail: chinaliping1981@126.com。

nant frequency of ground motion is similar to the natural frequency of the site, the larger the amplitude, the more serious the seismic subsidence is. Simultaneous input of horizontal and vertical ground motions can better reflect the vibration and seismic subsidence response of the soil. The results have a certain guiding significance for exploring the mechanism of seismic subsidence of soft soils.

Keywords: ground motion; soft soil; seismic subsidence; OpenSees; influence factor

0 引言

软土震陷是由于地震引起软土软化而产生的地面或地基沉降的现象,是软土地区发生的主要地基震害之一。如1976年唐山大地震造成地基为软黏土的天津滨海望海楼建筑群大面积震陷,附加沉降达38 cm,倾斜达3%^[1];1985年墨西哥地震导致多处建筑物倾斜,局部下沉大约一层,较严重者甚至基础翻倒^[2]。我国软土分布十分广泛,特别是在经济发达的沿海一带,大量建筑物修建在软弱地基上,给这一地区带来了潜在的地震灾害危险。

国内外学者对软土震陷的影响因素进行了大量的研究。H.B.Seed等^[3]研究软土的震陷特性时发现,一定静压力下固结的土样在动应力作用下易产生附加变形。郁寿松等^[4]认为土体震陷与动应力幅值、振动次数、固结应力以及土的类型有关。陈国兴等^[5]从基础条件入手,发现基底压力、地震动强度、基础尺寸、基础埋深、基础形式等对地基震陷有重要影响。孟上九等^[6]提出建筑物的不均匀震陷是由于软土土层、建筑物荷载不均匀分配以及地震动波形三者共同作用的结果,其中地震波的随机性与波形的不对称性和不规则性对不均匀震陷有重要影响。周燕国等^[7]通过对软土地基的离心机试验发现结构物不对称性及建筑物上覆荷载对不均匀震陷均有显著影响。李楠^[8]采用OpenSees数值模拟分析软土震陷的影响因素,发现软土震陷受到地震动幅值、场地条件以及上覆荷载的影响。

综上所述,国内外学者通过土工试验以及数值模拟方法分别从上覆荷载、土层特性、地震动特性、场地特性等几个方面对软土震陷开展了一系列研究并取得了大量成果。但鉴于饱和软黏土灵敏度高、压缩性强、透水性低、强度低等复杂性质,目前对于软土震陷的影响因素还没有统一的说法,尤其是地震动特性对软土震陷的影响认识还不够深刻。基于此,本文采用基于OpenSees的数值模拟研究方法,通过改变地震动幅值、频谱特性以及地震动输入方式开展软土震陷的影响研究,阐述不同地震动工况

下软土地基的震陷响应。研究成果对认识软土震陷机理及软土地基抗震设计具有重要指导意义。

1 数值分析方法

本文基于OpenSees进行软土震陷的数值模拟。OpenSees全称Open System for Earthquake Engineering Simulation,是一款广泛应用于地震工程领域的面向对象的开源有限元软件。OpenSees的优势在于源代码完全开放,用户对其本构模型、单元形式和求解算法进行选择,也可根据其独特需求进行再次开发,因此OpenSees在地震工程领域具有较强的适用性。

1.1 本构模型

本文计算选用的本构模型是Pressure Independent Multi Yield(简称PIMY)模型。PIMY是一种在偏应力-应变条件下才显示塑性的弹塑性材料模型,其体积应力-应变状态是线弹性应力-应变响应,且不受偏应力-应变响应影响^[9]。PIMY可以用于模拟剪切行为对约束改变不敏感的实际材料在单调荷载或循环荷载下的响应,比如含有机质土或不排水状态下的黏土。

图1所示为该材料的应力-应变关系曲线。在施加重力荷载阶段,也就是固结阶段,PIMY材料显示线弹性的特点。随后进入动力加载阶段,材料的应力-应变响应则表现为弹塑性。该材料的塑性计算基于多屈服面原则以及对应流动法则,屈服面服从于VonMises屈服准则。

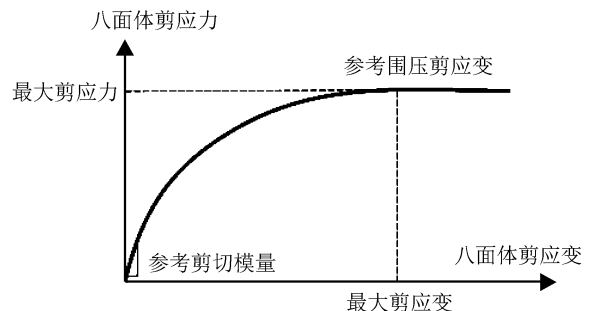


图1 PIMY应力-应变关系

Fig.1 Stress-strain relationship of PIMY

2 模型设计

2.1 计算模型

建立如图 2 所示的二维软土地模型。模型尺寸为 30 m(长)×20 m(宽)。根据文献[10],单元尺寸应小于波长的 1/8~1/12,为兼顾计算效率及计算稳定性,设置网格单元尺寸为 0.5 m。上部模拟 3 层框架结构,将基础结构简化,直接落在场地上。模型底部为固定边界,表面不排水;模型两侧以及基础与地基接触面采用强制位移边界^[11],设定模型左右两侧土体以及基础-地基土体保持位移同步。

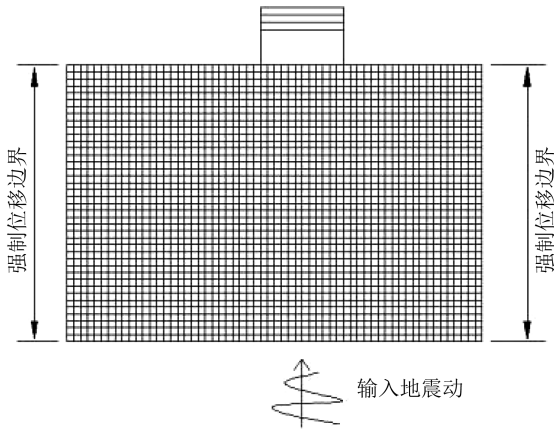


图 2 软土地二维模型示意图

Fig.2 Two-dimensional model diagram of soft soil site

模型采用上述的 PIMY 材料,土体单元为基于 Biot 多孔介质理论的四节点 quad U-P 单元。因为本文重点讨论地震动特性对软土震陷的影响,所以软土参数^[12]选用经验参数,如表 1 所列。首先进行

重力计算,即施加重力进行初始地应力场的弹性计算;再通过 Update Material 命令升级材料进入到塑性计算阶段,进行永久变形计算;最后施加地震动荷载进行动力分析。

表 1 计算模型参数取值

Table 1 Parameter values of calculate model	
参数	取值
密度/(t·m ⁻³)	1.3
剪切模量/kPa	1.3×10 ⁴
体积模量/kPa	6.5×10 ⁴
黏聚力/kPa	18
峰值剪应变	0.1
摩擦角/(°)	0
参考围压/kPa	100
屈服面数量	20

2.2 输入地震动

为了研究地震动幅值、频谱特性以及地震动输入方向对软土震陷的影响,本文采用以下几种输入地震动:

(1) 采用基底一致激励方式从模型底部水平方向输入 El Centro 地震动,以获得该地震动作用下的场地震陷反应。地震动加速度时程与傅里叶谱如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,峰值加速度出现在 2.02 s,为 0.319g;从图 3(b)可以看出,该地震动低频成分集中,且主要集中在 10 Hz 以下,卓越频率为 1.17 Hz,对应的傅里叶幅值为 0.25。为研究峰值地震动对软土震陷的影响,将输入的 El Centro 地震动峰值加速度调整为 0.15g、0.3g、0.4g,采用基底一致激励方式从模型底部水平方向输入,分别进行数值模拟。

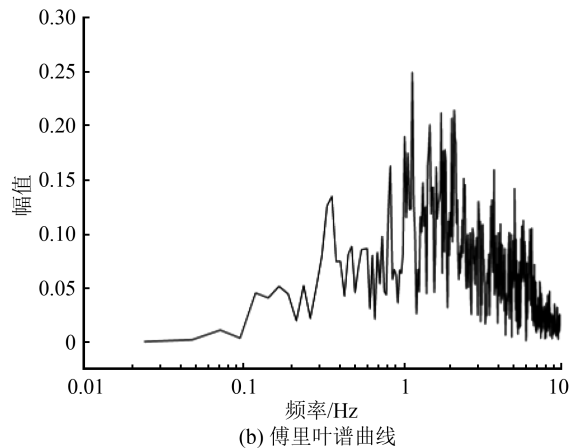
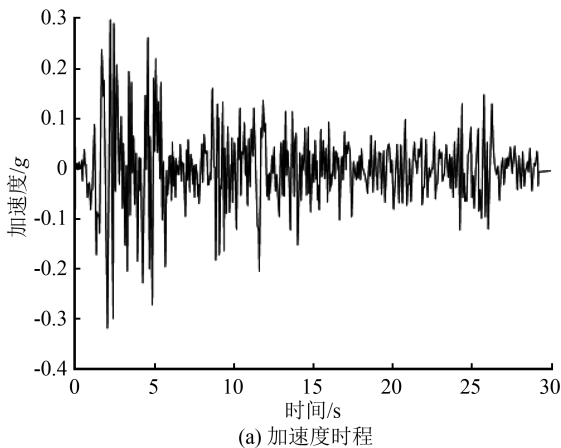


图 3 El Centro 地震动加速度时程与傅里叶谱曲线

Fig.3 Acceleration time-history curve and Fourier spectrum curve of El Centro wave

(2) 为研究地震动频谱特性对软土震陷的影响,引入 Kobe 地震动和 Taft 地震动,将其峰值加

速度均调整为 0.3g,分别进行数值模拟。Kobe 地震动加速度时程曲线与傅里叶谱如图 4 所示,该地

震动低频成分较为丰富,主要集中在5 Hz以下,卓越频率为1.45 Hz,对应的傅里叶幅值为0.21。Taft地震动加速度时程曲线与傅里叶谱如图5所示,该

地震动15 Hz以下低频成分较为丰富,主要集中在8 Hz以下,卓越频率为1.36 Hz,对应的傅里叶幅值为0.28。

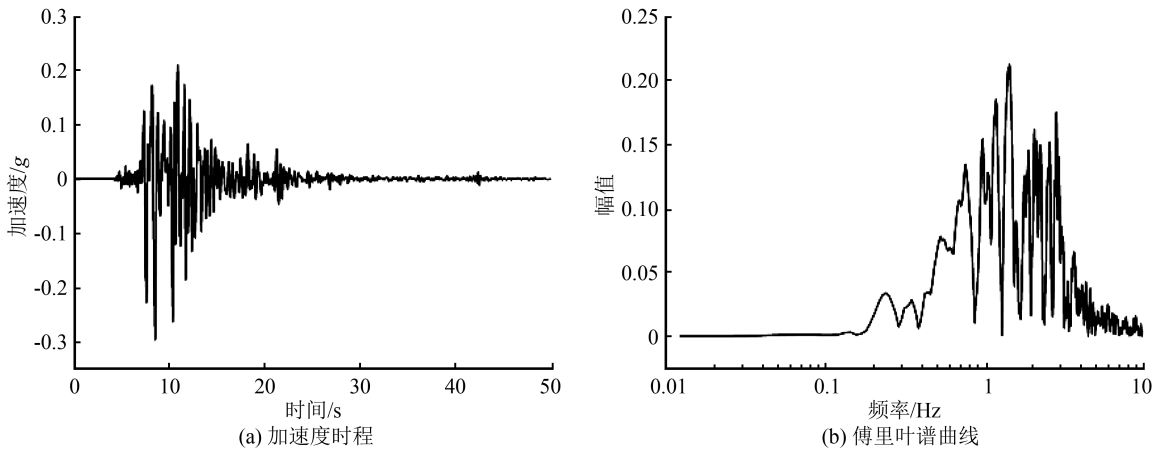


图4 Kobe地震动加速度与傅里叶谱曲线

Fig.4 Acceleration time-history curve and Fourier spectrum curve of Kobe wave

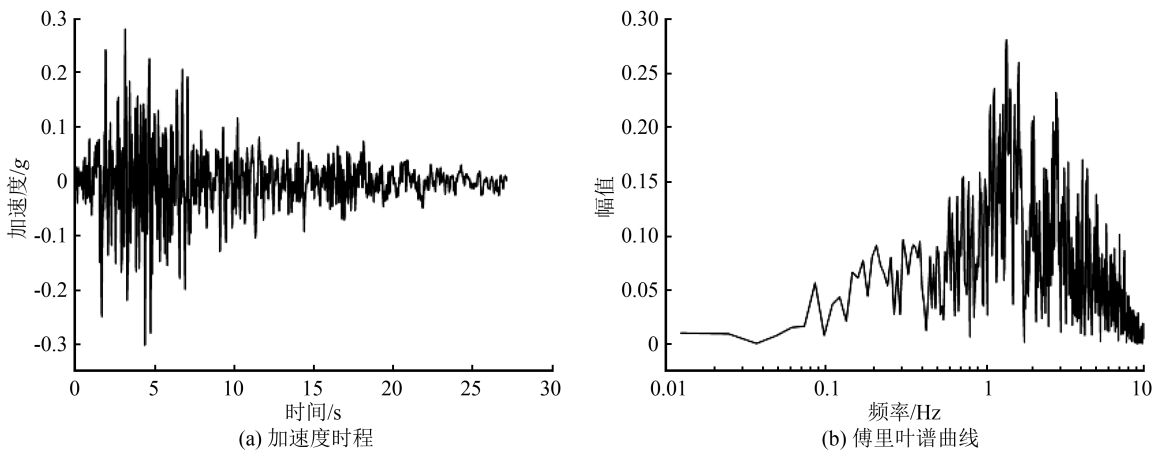


图5 Taft地震动加速度与傅里叶谱曲线

Fig.5 Acceleration time-history curve and Fourier spectrum curve of Taft wave

(3) 为研究地震动输入方向对软土震陷的影响,将地震动输入方向调整为水平方向输入,竖直方向输入,以及水平、竖直方向同时输入。

3 数值模拟结果

采用基底一致激励方式从模型底部水平方向输入El Centro地震动,获得基底最大竖向位移时程曲线、震陷沿埋深的分布曲线以及地表不均匀震陷曲线,分别如图6、7、8所示。

由图6可知,输入地震动2 s后达到峰值加速度,从此时开始震陷量快速增加,约25 s时震陷量趋于稳定,最终绝对震陷量达8.0 cm,震陷量增长段与地震动时程基本吻合。图7反映了震陷随埋深

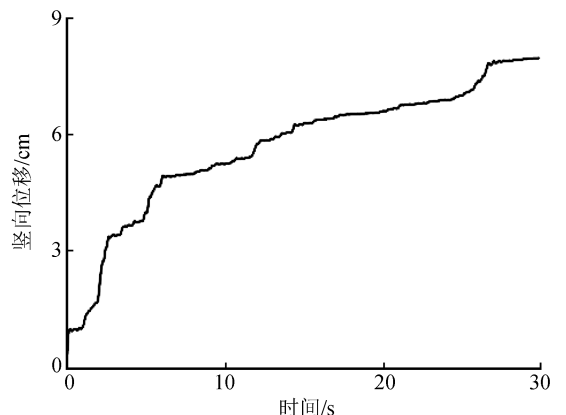


图6 基底最大竖向位移时程曲线

Fig.6 The maximum vertical displacement time-history curve at the foundation

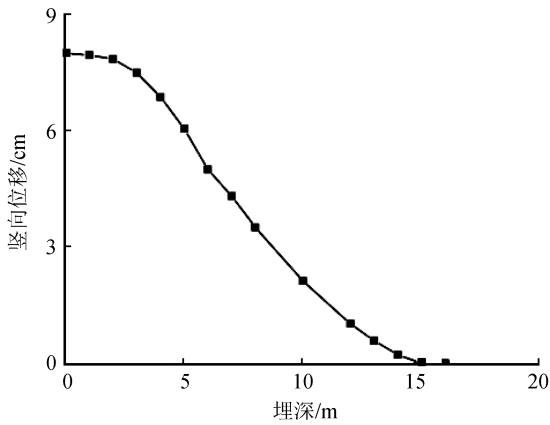


图 7 震陷沿埋深的分布

Fig.7 Distribution of seismic subsidence along the depth

的分布规律:震陷从埋深 15 m 处开始发育;埋深 3~12 m 的范围内土层相对震陷较明显;埋深 3 m 至地表的范围内土层几乎没有相对震陷。

图 8 反映了地表不均匀震陷。经过震陷前后的对比发现,地基土呈整体剪切破坏,地表不均匀震陷现象十分严重。震陷主要发生在基础底部,表现为地基土的严重沉降以及基础底面的轻微倾斜,这一现象表明软土震陷对上覆建筑物荷载十分敏感。基础两侧土体受到挤压力作用发生塑性变形并向上隆起,在距基础约 2 m 的位置地表出现隆起,说明震陷不仅造成地基土的竖向沉降,而且能引起水平向一定范围内的地表隆起,该隆起同样可以造成灾害,因此应该引起重视。

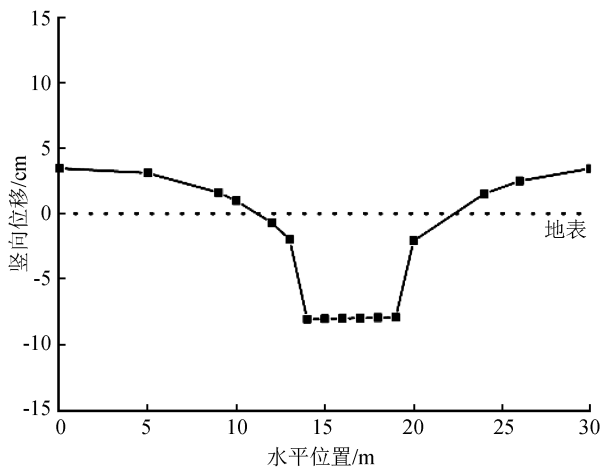


图 8 地表不均匀震陷

Fig.8 Uneven seismic subsidence at surface

3.1 地震动幅值对软土震陷的影响

输入调幅后的 El Centro 地震动,获得不同峰值地震动作用下的竖向位移时程曲线、震陷沿埋深

的分布曲线以及地表不均匀震陷曲线,分别如图 9、10、11 所示。

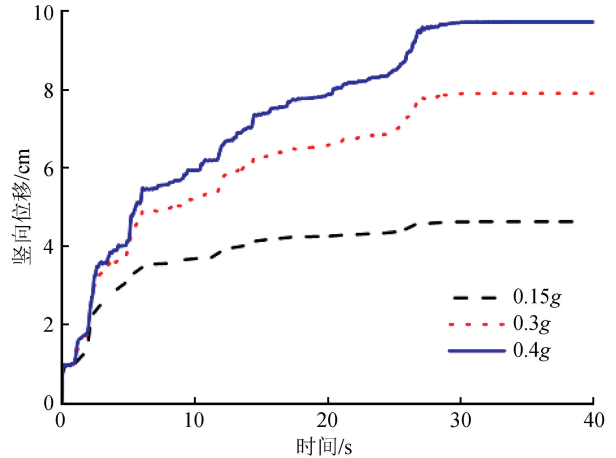


图 9 不同峰值地震动作用下竖向位移时程曲线

Fig.9 Vertical displacement time-history curves under different peak acceleration

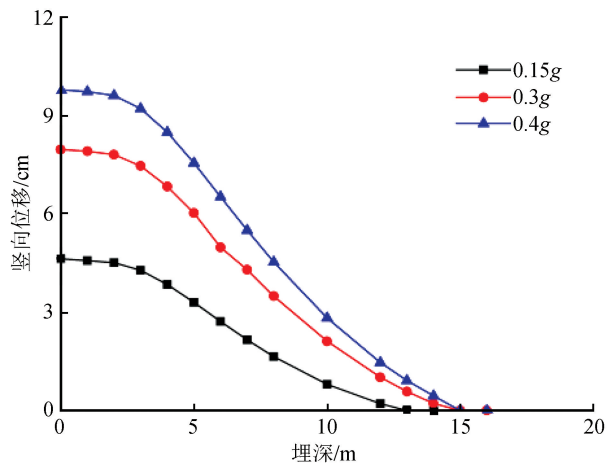


图 10 不同峰值地震动下震陷沿埋深的分布

Fig.10 Vertical subsidence along the depth under different peak acceleration

由图 9 可知,在峰值 0.15g 地震动作用下的震陷为 4.6 cm,与 0.3g 作用下的 7.9 cm 相比低 71%,与 0.4g 作用下的 9.8 cm 相比低 113%,说明随着地震动峰值加速度的增加,震陷量也显著增大。由图 10 可知,尽管地震动峰值加速度不同,震陷量随埋深的分布仍遵循以上趋势;埋深在 3 m 以上的地基土层间相对震陷很小;埋深在 3~12 m 范围内的地基土有明显的相对位移,但区别是强震的影响深度达 15 m,比 0.15g 地震动下的 12 m 影响深度深 25%。

在不同峰值加速度的地震动作用下,地表不均匀震陷有较大差别。由图 11 可知,地震动峰值加速度越大,震陷越严重,基础两侧土体隆起越大;从模

型两侧土体的竖向位移趋势可以推测大震在水平地表造成的破坏范围更广。根据土体隆起趋势推断,大震造成的水平地表破坏范围是小震的2倍。

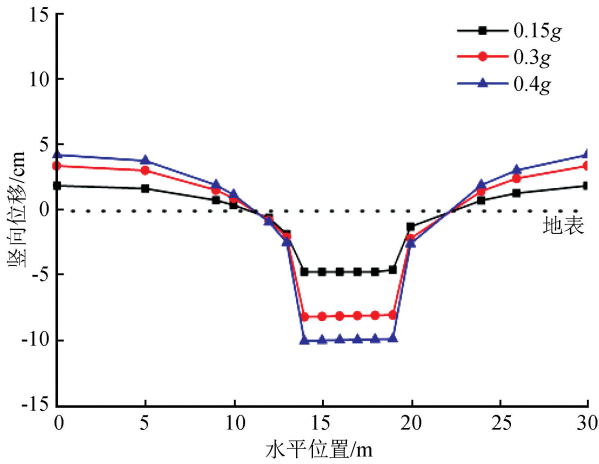


图 11 不同峰值地震动下地表不均匀震陷

Fig.11 Uneven seismic subsidence at surface under different peak acceleration

3.2 频谱特性对软土震陷的影响

输入不同频谱地震动,获得不同频谱特性下的竖向位移时程曲线、震陷沿埋深的分布曲线以及地表不均匀震陷,分别如图 12、13、14 所示。

由图 12 可知,受频谱特性的影响,三条位移曲线呈现出不同的增长趋势,其中 Kobe 地震动在 7 s 时开始引起土体震陷,与图 4 所示加速度起震时间相符。由图 13 可得,震陷量从大到小依次是:Taft、El Centro、Kobe;在地表至 3 m 内地基土体的相对震陷无明显变化,埋深在 3~12 m 范围内的相对震陷最大;震陷影响深度由大到小依次是:Kobe、El Centro、Taft。

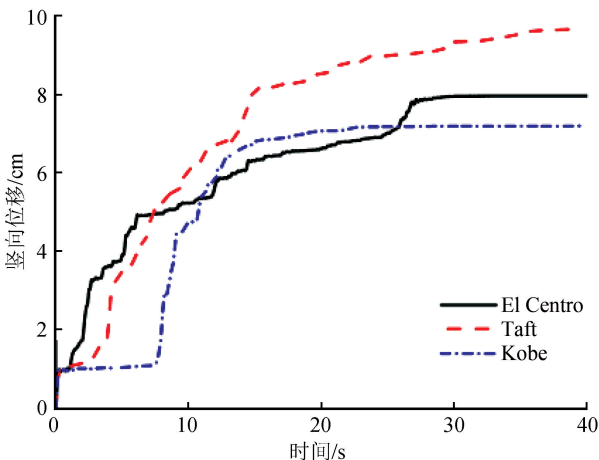


图 12 不同频谱特性地震动下竖向位移时程曲线

Fig.12 Vertical displacement time-history curves under different spectrum characteristics

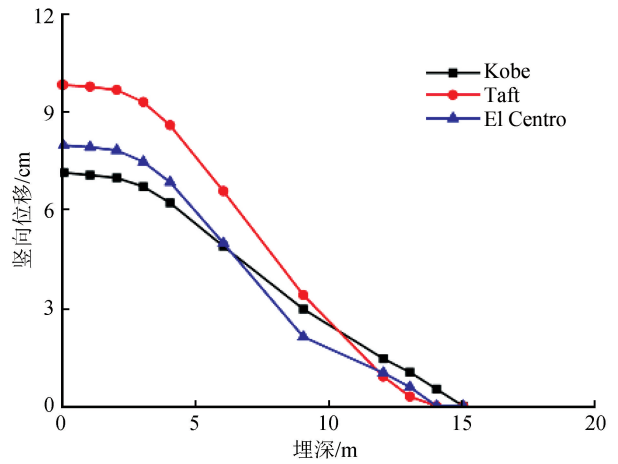


图 13 不同频谱特性下震陷沿埋深的分布

Fig.13 Seismic subsidence along the depth under different spectrum characteristics

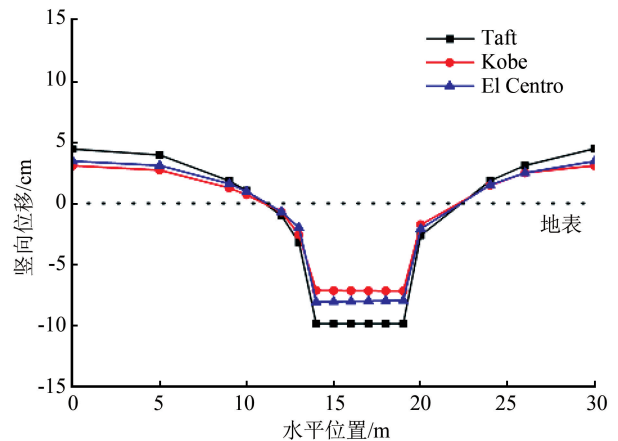


图 14 不同频谱特性下地表不均匀震陷

Fig.14 Uneven seismic subsidence at surface under different spectrum characteristics

由图 14 可知,三条地震动分别造成了不同程度的震陷,这充分反映了地震动频谱特性对软土震陷的影响:由于模型场地的自振频率约为 1.2 Hz,而 Taft 地震动低频分量多,傅里叶谱值最大,卓越频率与场地自振频率 1.2 Hz 最为接近,在共振效应的作用下地基的竖向位移明显增大;El Centro 地震动低频分量相对较多,但其傅里叶谱值低于 Taft 地震动,因此造成的震陷低于后者;Kobe 地震动同样以低频分量为,但卓越频率与场地自振频率相差较大,且傅里叶谱值最低,因此在同样情况下其造成的震陷最小。以上说明低频分量、地震动卓越频率及傅里叶谱值对软土震陷起到了显著影响,低频分量越多、傅里叶谱值越高,造成的震陷越大。

3.3 输入方式对软土震陷的影响

调整地震动输入方式,获得不同地震动输入方

式下的竖向位移时程曲线、震陷随埋深的分布以及地表不均匀震陷,分别如图 15、16、17 所示。

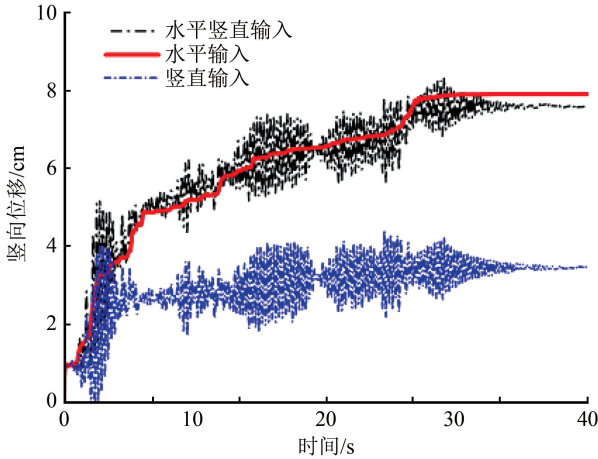


图 15 不同输入方向下竖向位移时程曲线

Fig.15 Vertical displacement time-history curves under different input directions

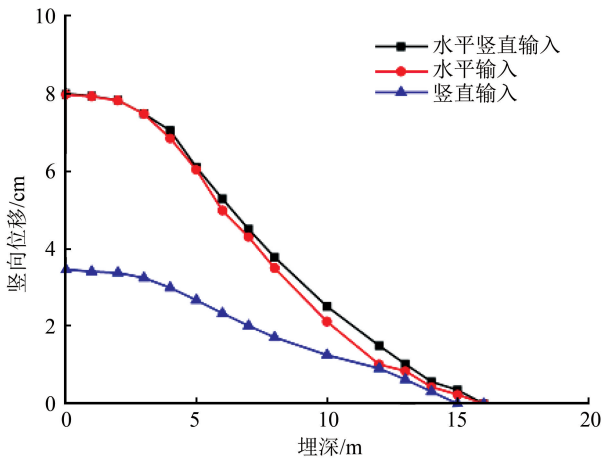


图 16 不同输入方向下震陷随埋深分布

Fig.16 Seismic subsidence along the depth under different input directions

由图 15 可见,只输入竖向地震动时,土体的竖向位移随地震动加速度时程曲线上下振动,并引起土体震陷,但震陷远小于另两种情况,因此垂直方向输入地震动这一情况一般不予以考虑;另外两种情况在震陷量的计算上无明显差别,但由于有水平、竖向地震动共同作用,其竖向位移呈具有振动反应的曲线。由图 16 可见,垂直方向输入地震动时产生的震陷量差别最大,其余二者震陷在数值以及形态上大致相同。由图 17 可见,当水平、竖向向地震动同时输入时基础发生了轻微的不均匀沉降,但其不均匀震陷结果相差不大,说明水平、竖向同时输入地震动的方式更能反映土体的振动以及震陷响应。

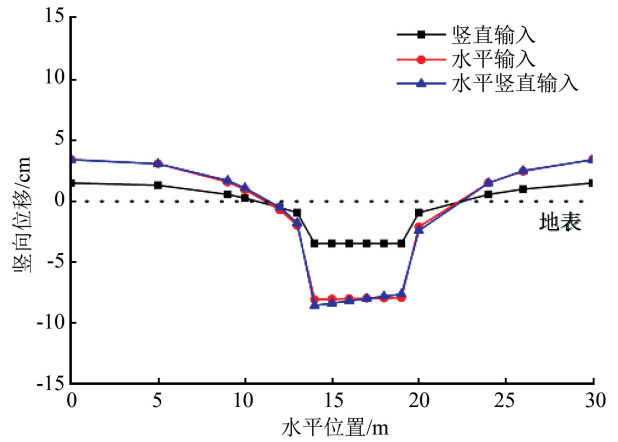


图 17 不同输入方向下地表不均匀震陷

Fig.17 Uneven seismic subsidence at surface under different input directions

4 结论与讨论

通过对地震动峰值加速度、频谱特性、地震动输入方式等影响因素的数值计算,分析了其对软土震陷的影响,得到以下结论:

(1) 震陷受到地震动峰值的影响,地震动峰值加速度越大,震陷量增加越大,震陷影响深度越大,对水平地表造成的破坏范围越大;地震动峰值加速度以及上覆荷载对地基土的不均匀震陷有显著的影响。

(2) 地震动频谱特性对软土震陷有显著的影响,当地震动卓越频率与场地自振频率接近时,其幅值越大,产生的震陷越严重。

(3) 在数值模拟中,地震动输入方式会造成软土震陷结果的差异。水平方向输入或水平、竖向同时输入地震动产生的震陷量相差不大,但水平、竖向同时输入地震动的方式更能反映土体的振动情况以及震陷响应,因此在进行软土震陷计算分析时不能忽略地震动输入方式的影响。

本文基于 OpenSees 有限元软件平台研究了地震动对软土震陷的影响,得到了一些意义的结论,但由于采用的是简化基础的二维模型,与实际地震引发软土震陷的过程有一定差别,不能真实反映强震时软土震陷的发生状态,因此需要建立三维模型并模拟真实情况下基础与软土地基的相互作用,才能获得更为可靠的数值分析结果。

软土震陷机理是一非常复杂的和疑难的科学问题,本文仅分析了地震动特性对软土的影响,提供了一种软土震陷影响因素数值模拟分析方法,下一步

应结合软土性质、上部荷载以及基础和土的相互作用开展更深入的细致研究。

参考文献(References)

- [1] 刘恢先.唐山大地震震害[M].北京:地震出版社,1986
LIU Huixian. Tangshan Earthquake Damage[M]. Beijing: Seismological Press, 1986.
- [2] 中国科学院工程力学研究所.海城地震震害[M].北京:地震出版社,1979.
Institute of Engineering Mechanics, Chinese Academy of Science. Haicheng Earthquake Damage[M]. Beijing: Seismological Press, 1979.
- [3] SEED H B, CHAN C K. Clay Strength under Earthquake Loading Condition[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1996, 92(SM2): 53.
- [4] 郁寿松, 石兆吉. 土壤震陷试验研究[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 35-44
YU Shousong, SHI Zhaoji. Experimental Investigation of Soil Settlement Due to Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 35-44.
- [5] 陈国兴, 李方明, 从卫民. 多层建筑物地基震陷的简化计算方法及其影响因素分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(1): 47-52.
CHEN Guoxing, LI Fangming, CONG Weimin. A Simplified Method for Calculating Earthquake-induced Foundation Settlement of Multi-storied Buildings and Analysis of Influencing Factors[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(1): 47-52.
- [6] 孟上九, 袁晓铭. 建筑物不均匀震陷影响因素研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(1): 111-116.
MENG Shangjiu, YUAN Xiaoming. Analysis of Influence Factors for Earthquake-induced Differential Settlements of Buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(1): 111-116.
- [7] 周燕国, 陈云敏, 社本康广, 等. 软黏土地基上建筑物不均匀震陷离心机试验研究[J]. 中国科学(E辑: 技术科学), 2009, 39(6): 1129-1137.
ZHOU Yanguo, CHEN Yunmin, SHE Benkangguang, et al. Centrifuge Test of the Uneven Settlement of Buildings on Soft Clay Foundation[J]. Science in China (Series E: Technological Sciences), 2009, 39(6): 1129-1137.
- [8] 李楠. 基于 OpenSees 的软土震陷及其影响因素研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2015.
LI Nan. Research on Earthquake-induced Differential Settlement and Its Influencing Factors Based on OpenSees[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2015.
- [9] YANG Z H, ELGAMAL A, PARRA E. Computational Model for Cyclic Mobility and Associated Shear Deformation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12): 1119-1127.
- [10] 廖振鹏. 近场波动的数值模拟[J]. 力学进展, 1997, 27(2): 193-216.
LIAO Zhenpeng. Numerical Simulation of Near-field Wave Motion[J]. Advances in Mechanics, 1997, 27(2): 193-216.
- [11] COOK R D, MALKUS D S, PLESHA M E, et al. Concepts and Applications of Finite Element Analysis (4th Edition) [M]. New York: John Wiley and Sons, 2007.
- [12] YANG Z H, LU J C, ELGAMAL A. A Web-based Platform for Computer Simulation of Seismic Ground Response[J]. Advances in Engineering Software, 2004, 35(5): 249-259.