

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.016

上覆黏土层条件下考虑空间变异的 砂土地基地震液化可靠度研究

陈 胜¹, 周旭辉², 吴勇信²

(1. 江苏省岩土工程公司, 江苏 南京 210019; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于 FLAC3D 有限差分软件, 对上覆黏土层的砂土地基地震液化响应动力可靠度进行研究, 建立了黏土-砂土地基平面应变模型, 通过模拟土体剪切模量的空间变异性, 利用蒙特卡洛模拟方法并结合生成的非高斯随机场评估液化区面积、超孔隙水压力和地表位移, 研究了不同剪切模量变异系数(COV)对地基地震液化可靠度的影响。结果表明: 剪切模量变异系数越大, 液化范围缩小越困难, 液化范围峰值的分布范围越分散; 地表水平位移和地表最大差异沉降均随剪切模量变异系数的增大而增大。

关键词: 空间变异性; 上覆黏土; 砂土地基; 地震液化

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)03-0121-06

Study on reliability of seismic liquefaction under the condition of overlying clay layer considering the spatial variability of sandy soil

CHEN Sheng¹, ZHOU Xuhui², WU Yongxin²

(1. Jiangsu Geotechnical Engineering Company, Nanjing 210019, China;

2. School of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the FLAC3D finite difference software, the dynamic reliability of seismic liquefaction response of sandy soil foundation covered with clay layer was studied, and a plane-strain model of clay-sandy soil foundation was established. By simulating the spatial variability of soil shear modulus, the area of liquefaction zone, excess pore water pressure and surface displacement were evaluated using the Monte Carlo simulation method and the generated non-Gaussian random field. The influence of different coefficient of variation (COV) on the reliability of seismic dynamic liquefaction of foundation was studied. The results show that the larger the COV of shear modulus, the more difficult it is to reduce the liquefaction range and the more dispersed the distribution range of peak liquefaction range; the horizontal displacement and maximum differential settlement of the surface increase with the increase of COV of shear modulus.

Key words: spatial variability; overlying clay; sand foundation; seismic liquefaction

岩土工程的地震响应分析得到了越来越多学者的关注^[1-4]。砂土地基的地震响应是一个重要的工程问题。地震作用下, 饱和砂土趋于密实, 土体表现出孔隙水压力升高的特性。由于地震作用时间短, 这种急剧上升的孔隙水压力来不及消散, 导致土颗粒间的有效应力突然降低, 进而使土体的抗剪强度降低, 影响了地基的稳定性^[5]。2008 年中国汶川地震就明显发现由于地震液化导致地基和结构发生严重破坏的现象。这些破坏引起人们对防治土体液化的广泛关注, 不少学者利用室内模型试验和数值模拟对其进行了研究。董瑞等^[6]针对含弱渗透性覆盖层的饱和砂土地基进行离心机振动台试验, 并采用 OpenSees 软件对试验模型进行数值模拟。蔡正银等^[7]通过离心机振动台试验研究了深埋砂层地基的动力反应和液化规律。许成顺等^[8]进行了可液化自由场在水平地震动激励下的大型振动台模型试验, 分析了饱和砂土液化后场地加速

基金项目: 国家自然科学基金(52078186)

作者简介: 陈胜(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事岩土工程设计研究。E-mail: 380316018@qq.com

通信作者: 吴勇信(1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: yxwuhhu@163.com

引用本文: 陈胜, 周旭辉, 吴勇信. 上覆黏土层条件下考虑空间变异的砂土地基地震液化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 121-126.

CHEN Sheng, ZHOU Xuhui, WU Yongxin. Study on reliability of seismic liquefaction under the condition of overlying clay layer considering the spatial variability of sandy soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 121-126.

度、位移等动力响应。Zhuang 等^[9]利用商业有限元软件分析了现有地铁结构在液化土中的相互作用效应及其附近的液化响应。张艳美等^[10]采用 FLAC3D 软件分析一致激励、局部液化和行波激励对隧道结构动力响应的影响。Ali 等^[11]采用 FLAC2D 程序进行数值模拟,研究了土体类型、结构重量和液化土层厚度对地震反应的影响。Chen 等^[12]通过数值模拟研究了 3 种典型的土剖面对地下结构的影响,发现地下结构穿过液化层时会对结构的地震响应产生不利影响。

上述不同研究中土的性质和荷载特性都是以某个确定的数值表示,而在工程实践中,结构周围土体与地震荷载具有随机性和空间变异性。Miao 等^[13-14]从地震荷载的空间变异性对隧道的不同响应进行了分析;Wu 等^[15-17]在不同土工设计概率方法数值分析中分别引入土体的空间变异性 and 不确定性,明确指出考虑土体空间变异特性的重要性。目前对于土地地震液化空间变化规律的研究方面,Popescu 等^[18]将非线性有限元分析与蒙特卡罗模拟和非高斯向量场结合,研究了土体参数的空间变异性对土体液化的影响,发现在相同地震荷载的作用下,考虑土体参数空间变异性的土体会比同等条件下的均质土体在地震发生时累积更多的孔隙水压力;Lopez-Caballero 等^[19]评估了土壤参数对砂土地震反应的随机性,发现随机模型的相关长度明显地决定了液化概率。

土体空间变异性对土体液化有显著影响,但大多数学者对砂土地基地震响应还是基于均质土体的假设进行计算分析,忽略了土体的成层性及空间变异性,这与实际情况不符,并且可能在一定程度上低估了工程问题的危险性^[20-22]。本文基于土体空间变异性对地震诱发土体液化的影响等问题进行数值研究,采用结合蒙特卡罗模拟的有限差分法来评估液化区面积、超孔隙水压力和地表位移,比较了不同空间相关非高斯随机场的随机模型对土体剪切模量的模拟结果,分析了土体剪切模量变异系数对上覆黏土层砂土地基地震动力响应的影响。

1 剪切模量随机场模拟方法

剪切模量随机场模拟主要步骤为:首先生成一个空间相关随机场的样本函数来表示分析区域内剪切模量的分布,生成特定的土体参数,随后将其导入有限差分程序,并进行动态响应分析,在一系列蒙特卡罗模拟之后,最终得到土体液化响应规律。

选用谱表现法^[23-24]并通过 MATLAB 程序模拟各向异性空间相关的剪切模量非高斯随机场,谱表现法在随机场模拟上表现出良好的特性,并用二维相关函数来描述剪切模量在空间中的相关性:

$$\rho = \exp\left(-\frac{2|\tau_x|}{\delta_x}\right) \exp\left(-\frac{2|\tau_z|}{\delta_z}\right) \tag{1}$$

式中: τ_x 、 τ_z 分别为空间任意两点在水平和竖直方向的滞后距离; δ_x 、 δ_z 分别为在水平和竖直方向的波动范围,波动范围是描述土体参数在空间中相关性大小的参数。

均值为 0,标准差为 1 的二维高斯随机场 $\bar{g}(x,z)$ 可由如下公式得到:

$$\bar{g}(x,z) = \sum_{l_1=0}^{N_1-1} \sum_{l_2=0}^{N_2-1} \sqrt{S_G(\kappa_{xl_1}, \kappa_{zl_2}) \Delta\kappa_x \Delta\kappa_z} [\cos(\kappa_{xl_1}x + \kappa_{zl_2}z + \varphi_{l_1l_2}^1) + \cos(\kappa_{xl_1}x - \kappa_{zl_2}z + \varphi_{l_1l_2}^2)] \tag{2}$$

其中

$$\begin{aligned} \kappa_{xl_i} &= l_{1i} \Delta\kappa_x & (l_{1i} = 0, 1, \dots, N_1 - 1) \\ \kappa_{zl_i} &= l_{2i} \Delta\kappa_z & (l_{2i} = 0, 1, \dots, N_2 - 1) \\ \Delta\kappa_x &= \kappa_{xu}/N_1 & \Delta\kappa_z = \kappa_{zu}/N_2 \end{aligned}$$

$$S_G(\kappa_x, \kappa_z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_G(\xi_x, \xi_z) e^{-i(\kappa_x \xi_x + \kappa_z \xi_z)} d\xi_x d\xi_z$$

式中: $\Delta\kappa_x$ 、 $\Delta\kappa_z$ 分别为频率坐标轴上 κ_x 和 κ_z 的离散区间; κ_{xl_i} 、 κ_{zl_i} 分别为对应方向的截断频率; $\varphi_{l_1l_2}$ 为两个相互独立的随机变量序列,其满足 $(0, 2\pi]$ 之间的均匀分布; $S_G(\kappa_x, \kappa_z)$ 为目标高斯功率谱函数; ξ_x 、 ξ_z 分别为水平和竖直方向上的坐标值; N_1 、 N_2 分别为沿水平和竖直方向离散功率谱密度函数的点数; κ_{xu} 、 κ_{zu} 分别为相应的上截止波数; ρ_G 为相关函数。对于式(1)定义的互相关函数,其对应的功率谱密度函数为

$$S(\kappa_x, \kappa_z) = \frac{2\delta_x}{\pi(4 + \delta_x^2 \kappa_x^2)} \frac{2\delta_z}{\pi(4 + \delta_z^2 \kappa_z^2)} \tag{3}$$

本文需模拟的土体剪切模量随机场符合 Lognormal 分布,为非高斯随机场,而式(1)生成的随机场符合高斯分布。假设 $\bar{y}(x,z)$ 为均值为 0、标准差为 1 的非高斯随机向量场,可由高斯随机向量场通过映射得到:

$$\bar{y}(x,z) = F_y^{-1}[\Phi(\bar{g}(x,z))]$$

(4)

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准高斯累积概率密度函数; $F_y(\cdot)$ 为标准非高斯函数的边缘非高斯累积概率密度函数,其逆为 $F_y^{-1}(\cdot)$ 。

Wu 等^[24]提出一种具有较高计算效率和收敛速度的样本迭代方式,可得到潜在高斯概率密度函数。当确定了潜在高斯概率密度函数 $S_G(\kappa_x, \kappa_z)$,通过式(2)即可得到标准潜在高斯随机向量场,由式(4)可映射得到标准非高斯随机向量场。

2 数值模型与参数

2.1 计算模型

采用有限差分软件 FLAC3D 建立二维平面应变模型,对存在 5 m 厚的上覆层黏土及地下水位 1 m 以下砂土层在地震荷载作用下的液化反应进行非线性动力学模拟。砂土层动力液化分析范围在水平(x)、竖直(z)、纵深(y)方向分别为 40 m、10 m、1 m 的矩形区域。模型在 y 方向划分为一个单元格来模拟平面应变情况。下部 9 m 厚的饱和可液化砂土层上部覆盖了 1 m 厚的干砂层,即地下水水位位于地表下 1 m 处,而在干砂层上部增加了厚度为 5 m 的黏土层。本文土体均采用实体单元模拟,网格划分均为 1 m×0.5 m 的矩形网格,有限差分模型共 1 200 个网格,3 层土层从上到下分别为 400 个、80 个、720 个单元格,有限差分数值模型示意图如图 1 所示。

2.2 土体参数

土体参数参考试验所得^[25],采用 Mohr-Coulomb 模型来模拟土体非线性性状,可液化土层采用 Finn 模型模拟,该模型能够模拟土体在动荷载作用下孔隙水压力的累积直至液化的过程。Finn 模型的基础是摩尔-库伦模型,但是增加了动孔压的上升模式^[26]。

剪切强度满足空间非高斯随机场的特征,其均值为 20 MPa,土体的确定性分析中土体本构模型力学参数的取值如表 1 所示。

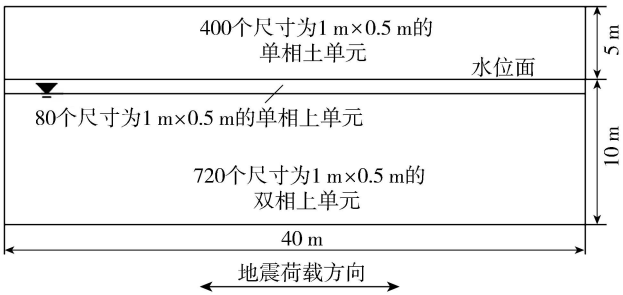


图 1 黏土-砂土液化地基数值模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of numerical model of clay-sand liquefaction foundation

表 1 土体数值计算模型参数取值

Table 1 Parameter values of soil numerical calculation model								
土层	厚度/m	干密度/(kg·m ⁻³)	黏聚力/kPa	泊松比	内摩擦角/(°)	剪切模量/MPa	孔隙率	渗透系数/(m·s ⁻¹)
砂土层	9	2 225	0	0.35	39	20	0.435	2.64×10 ⁻⁴
黏土层	5	2 225	30	0.35	30	20	0.435	2.64×10 ⁻⁴

2.3 动力荷载和边界条件

本文计算偏向规律性研究,采用较高的抗震设防烈度为标准,选用设防烈度为 8 度的 El-Centro 波作为输入波源,将峰值加速度为 0.3g、持时为 30 s 的 El-Centro 波加速度水平分量(图 2)施加于模型底部。

在静力计算过程中,土体仅受重力作用的静力平衡计算需要固定模型并控制边界位移才有意义,因此对模型底部所有方向的位移及侧边 x 、 y 方向的位移进行约束。而在动力计算过程中,边界被用来吸收反射的地震波和模拟数值模型的离散半空间条件,因此静力分析中的边界不再适用,故通过在侧边施加自由场边界来减少模型边界波的反射。此时模型底部解除约束以施加地震波。

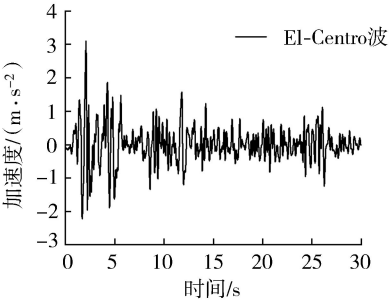


图 2 El-Centro 加速度时程曲线
Fig.2 Acceleration time history curve of El-Centro wave

基于上述数值模型和参数取值,赋予砂土层符合 Lognormal 分布、水平波动范围和竖向波动范围均为 6 m 的空间变异剪切模量随机场,对每种情况生成 200 种随机场工况进行黏土-砂土地基的地震动力液化可靠度分析,用不同的变异系数($C = 0.1, 0.3, 0.5$)评价剪切模量变异系数对液化响应的影响。饱和土在动力激励作用下的显著特征包括孔隙水压力的累积、内应力的降低和失稳。选用液化区域面积 $A_{80}(t)$ 和液化指数 $Q(z, t)$ 两个指标进行分析。 $A_{80}(t)$ 为发生液化区域的大小与砂土分析区域大小之比,可表示为

$$A_{80}(t) = S\left(\frac{\mu(t)}{\sigma'_{v0}} > 0.8\right) / S_T$$

(5)

式中: $\mu(t)$ 、 σ'_{v0} 分别为 t 时刻某空间位置的超孔隙水压力和初始有效竖向应力; $S(\cdot)$ 为液化区域面积; S_T 为砂土区域总面积。

$Q(z, t)$ 为高差 z 和 t 时刻的超孔隙水压力比的平均值,按水平方向平均超孔隙水压力计算:

$$Q(z, t) = \frac{1}{n} \sum_x \frac{\mu(x, z, t)}{\sigma'_{v0}}$$

(6)

式中: x 、 z 分别为元素在水平方向和垂直方向的中心坐标; n 为水平方向元素的个数。

3 计算结果与分析

3.1 上覆黏土层对液化范围的影响

图 3 为不同剪切模量变异系数下液化范围 A_{80} 时程曲线。在地震作用过程中,可以观察到 4 个不同阶段:在 0~6 s 处于液化区生长期阶段;6~8 s 处于液化区还原期阶段;8~20 s 处于液化区震荡期阶段;20~30 s 处于液化区消散期阶段,几乎没有发现反弹现象。

由图 3 可以看出,在液化区还原期,液化范围缩小的速率随剪切模量变异系数的增大而逐渐减小,并且在液化范围震荡期的残余液化面积大小也随剪切模量变异系数的增大而增大,即剪切模量变异系数的增大会使得液化范围缩小越困难。

图 4 为黏土-砂土地基的液化范围峰值概率分布(PDF)曲线,由图 4 可见,随着砂土剪切模量变异系数的增大,液化范围峰值的分布范围越分散,且 PDF 曲线的峰度越小。

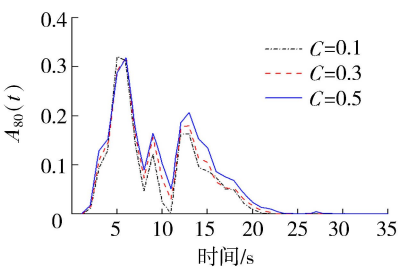


图 3 不同变异系数下黏土-砂土地基液化范围时程曲线

Fig.3 Time history curve of liquefaction range of clay-sand foundation under different coefficient of variation

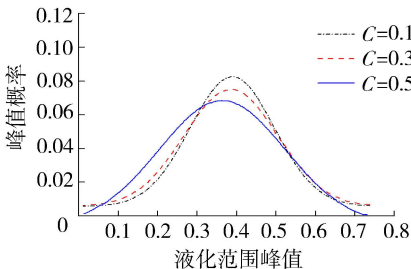


图 4 不同变异系数下黏土-砂土地基的液化范围峰值概率分布曲线

Fig.4 Peak probability distribution curve of liquefaction range of clay sand foundation under different coefficient of variation

3.2 上覆黏土层对超孔隙水压力比的影响

由于大量孔隙水压力持续累积在砂土层 7.25 m 深度,图 5 为黏土-砂土地基地表下 12.25 m 埋深处(即砂土层下 7.25 m 埋深处)的平均超孔隙水压力比 $Q(t)$ 时程曲线。超孔隙水压力比因地震荷载的作用,累积上升速率随剪切模量变异系数的增大而逐渐减小,超孔隙水压力消散速率(即 $Q(t)$ 时程曲线下降的斜直线段斜率)随剪切模量变异系数的增大而减小,这与液化范围缩小速率随变异系数的变化规律相对应。此外,也可观察到超孔隙水压力比因地震荷载瞬时增强而出现较小程度的反弹增大,但并未随变异系数不同而表现出明显的规律。

3.3 上覆黏土层对地表位移的影响

地表位移是地表结构稳定性的重要指标。为了研究上覆黏土条件下黏土-砂土地基地表位移情况,提取不同变异系数下 200 次随机性工况的地表(即黏土层表面)水平位移、沉降和差异沉降。

图6为不同剪切模量变异系数的地表水平位移均值和标准差时程曲线,可以看出下部砂土存在于上覆土层,其地表水平位移随砂土剪切模量变异系数的增大而增大,且地表水平位移的标准差也随剪切模量变异系数的增大而增大,表明剪切模量变异系数越大,地表水平位移越大且离散程度越大。

提取计算时间内黏土-砂土地基地表沉降最大值,绘制地表最大沉降的累计概率分布(CDF)曲线,如图7(图中黑、红、蓝色柱状图和实曲线分别代表砂土 $C=0.1$ 、 0.3 、 0.5 时的地表最大沉降累计分布及其拟合的累计概率分布曲线;黑色竖直实线表示使用砂土剪切模量随机场均值进行确定性分析得到的地表最大沉降值,黑、红、蓝色竖直虚线分别代表不同剪切模量变异系数下随机分析得到的最大沉降均值)所示。由图7可见,黏土-砂土地基的地表最大沉降分布范围随剪切模量变异系数的增大而逐渐广泛,且最大沉降均值随剪切模量变异系数

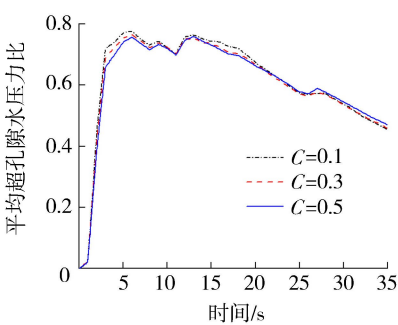


图5 地表下12.25 m埋深处超孔隙水压力比均值时程曲线

Fig.5 Time history curve of mean value of excess pore water pressure ratio at the depth of 12.25 m

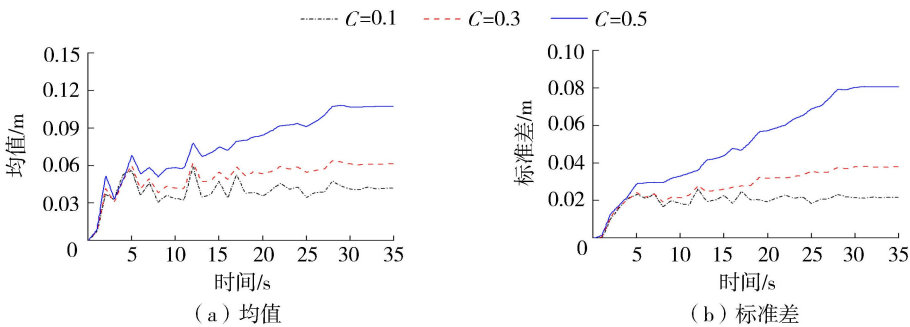


图6 不同变异系数下地表水平位移均值和标准差时程曲线

Fig.6 Time history curves of mean value and standard deviation of ground surface horizontal displacement under different coefficient of variation

的增大而增大。此外,均质确定性工况不能全面描述非均质砂土的液化位移特性,当 $C=0.1$ 、 0.3 、 0.5 时,200组随机工况中分别有33.5%、35.4%、38.2%的工况预测地表位移大于确定性均质工况的地表位移。

图8为黏土-砂土地基地表最大差异沉降的概率分布(PDF)曲线图。地表最大差异沉降是指地震发生后,地表处各个时刻发生的最大和最小沉降差值的最大值。由图8可知,对比不同砂土剪切模量变异系数随机场计算得到的地表差异沉降,可以发现地表最大差异沉降随剪切模量变异系数的增大而增大,且其随机结果的分散程度也随变异系数的增大而增大。

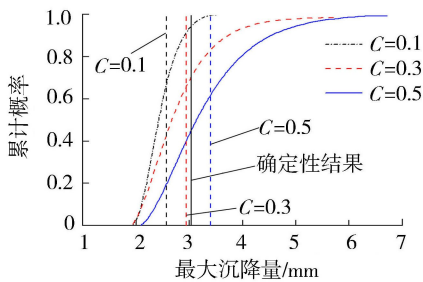


图7 地表最大沉降的累计概率分布曲线

Fig.7 Cumulative probability distribution curve of maximum surface subsidence

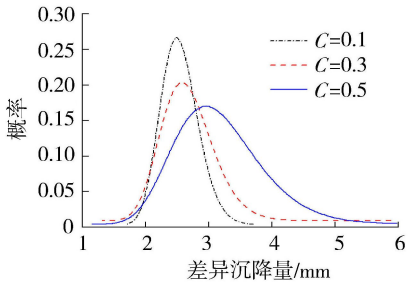


图8 地表最大差异沉降概率分布曲线

Fig.8 Probability distribution curve of maximum differential settlement of ground surface

4 结 论

a. 剪切模量变异系数对黏土-砂土地基在地震荷载下发生液化引起的液化范围、超孔隙水压力比和地表位移有一定的影响,即剪切模量变异系数越大,液化范围缩小越困难,液化范围峰值分布越分散,孔隙水压力消散越慢,地表水平位移越大且分布越广泛。

b. 从液化地基地表位移的角度而言,地表最大沉降分布范围随剪切模量变异系数的增大而逐渐广泛,且最大沉降均值随剪切模量变异系数的增大而增大;地表最大差异沉降也随剪切模量变异系数的增大而增大。

c. 剪切模量变异系数 $C=0.1$ 、 0.3 、 0.5 时,随机工况的地表位移分别有 33.5% 、 35.4% 和 38.2% 的概率大于确定性均质工况的地表位移,表明在分析砂土地基的地震响应时有必要考虑土体空间变异性。

参考文献:

- [1] 刘斯宏,李玲君,张雨灼,等. 土工袋挡土墙小型振动台试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(3):236-243. (LIU Sihong, LI Lingjun, ZHANG Yuzhuo, et al. Small-scale shaking table tests on retaining wall constructed with soilbags[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(3): 236-243. (in Chinese))
- [2] 钱向东,李晨,沈人杰. 广义阻尼模型及其在混凝土重力坝地震响应分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 98-104. (QIAN Xiangdong, LI Chen, SHEN Renjie. A generalized damping model and its application in seismic response analysis of concrete gravity dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 98-104. (in Chinese))
- [3] 佟大威,王星,任炳显,等. 考虑施工过程影响的 PCCP 地震响应分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):76-82. (TONG Dawei, WANG Xing, REN Bingyu, et al. Seismic response analysis of PCCP considering the effects of the construction process[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2): 76-82. (in Chinese))
- [4] 钱向东,李震东,李晨. 混凝土重力坝非黏滞阻尼地震响应分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):342-348. (QIAN Xiangdong, LI Zhendong, LI Chen, et al. Non viscous damped seismic response analysis of concrete gravity dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 342-348. (in Chinese))
- [5] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 5 版. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [6] 董瑞,景立平,单振东,等. 含弱渗透性覆盖层饱和砂土地震液化特性研究[J]. 地震工程学报,2020,42(4):955-959. (DONG Rui, JING Liping, SHAN Zhendong, et al. Seismic liquefaction characteristics of saturated sand with a low permeable covering layer[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4): 955-959. (in Chinese))
- [7] 蔡正银,吴诗阳,武颖利,等. 高地震烈度区深厚覆盖砂层液化研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(3):405-412. (CAI Zhengyin, WU Shiyang, WU Yingli, et al. Liquefaction of deep overburden layers in zones with high earthquake intensity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 405-412. (in Chinese))
- [8] 许成顺,豆鹏飞,杜修力,等. 液化自由场地震响应大型振动台模型试验分析[J]. 岩土力学,2019,40(10):3767-3777. (XU Chengshun, DOU Pengfei, DU Xiuli, et al. Large-scale shaking table model test of liquefiable free field[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 3767-3777. (in Chinese))
- [9] ZHUANG H Y, YANG J, CHEN S, et al. Seismic performance of underground subway station structure considering connection modes and diaphragm wall[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 127: 105842.
- [10] 张艳美,吴文涛,李国勋,等. 液化场地区间隧道地震响应分析[J]. 地震工程学报,2021,43(2):412-420. (ZHANG Yanmei, WU Wentao, LI Guoxun, et al. Seismic response analysis of running tunnels in liquefiable site[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(2): 412-420. (in Chinese))
- [11] ALI A, ALIAKBAR G, MOHSEN B. Numerical evaluation of seismic response of shallow foundation on loose silt and silty sand [J]. Journal of Earth System Science, 2014, 123: 365-379.
- [12] CHEN R R, TAIEBAT M, WANG R, et al. Effects of layered liquefiable deposits on the seismic response of an underground structure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 113: 124-135.
- [13] MIAO Y, YAO E L, RUAN B, et al. Seismic response of shield tunnel subjected to spatially varying earthquake ground motions [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77: 216-226.
- [14] YU H T, YUAN Y, XU G P, et al. Multi-point shaking table test for long tunnels subjected to non-uniform seismic loadings-Part II: application to the HZM immersed tunnel[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 108: 187-195.
- [15] WU Y X, GAO Y F, ZHANG N, et al. Simulation of spatially varying non-Gaussian and nonstationary seismic ground motions by the spectral representation method[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2018, 144(1): 04017143.
- [16] JIANG S H, LI D Q, ZHANG L M, et al. Slope reliability analysis considering spatially variable shear strength parameters using a non-intrusive stochastic finite element method[J]. Engineering Geology, 2014, 168(1): 120-128.

Géotechnique,2020,70(11):1067-1082.

[18] 刘珊,刘浩晨. 单向流作用下黏土中单桩基础冲刷试验研究[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(1):91-103. (LIU Shan,LIU Haochen. Experimental study on scouring of monopile foundation in clay under unidirectional flow effect[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2022,53(1):91-103. (in Chinese))

[19] XU Dongsheng, XU Xueyong, LI Wei, et al. Field experiments on laterally loaded piles for an offshore wind farm[J]. Marine Structures,2020,69:102684.

[20] 龚维明,霍少磊,杨超,等. 海上风机大直径钢管桩基础水平承载特性试验研究[J]. 水利学报,2015,46(增刊1):34-39. (GONG Weiming, HUO Shaolei, YANG Chao, et al. Experimental study on horizontal bearing capacity of large diameter steel pipe pile for offshore wind farm[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(Sup1):34-39. (in Chinese))

[21] 翟恩地,徐海滨,郭胜山,等. 响水海上风电钢管桩基础水平承载特性对比研究[J]. 太阳能学报,2019,40(3):681-686. (ZHAI Endi, XU Haibin, GUO Shengshan, et al. Comparative study on horizontal bearing capacity of steel pipe pile for Xiangshui offshore wind farm[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2019,40(3):681-686. (in Chinese))

[22] 罗仑博,王媛,翟恩地,等. 基于现场试验的钢管桩分层土 p - y 曲线研究[J]. 太阳能学报,2019,40(11):3258-3264. (LUO Lunbo, WANG Yuan, ZHAI Endi, et al. Study on p - y curve of monopile in layered soil based on field test[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2019,40(11):3258-3264. (in Chinese))

[23] 郇彩云,姜贞强,罗金平. 桩土相互作用模拟方法对海上风机整体结构模态分析的影响[J]. 水电能源科学,2013,31(1):236-238. (HUAN Caiyun, JIANG Zhengqiang, LUO Jinping. Influence of pile-soil interaction simulation method on modal analysis of offshore wind turbine structural[J]. Water Resources and Power,2013,31(1):236-238. (in Chinese))

[24] 朱斌,姜英伟,陈仁朋,等. 海上风电机组群桩基础关键问题的初步研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(增刊1):98-103. (ZHU Bin, JIANG Yingwei, CHEN Renpeng, et al. Investigation on pile group foundations for offshore wind turbines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(Sup1):98-103. (in Chinese))

[25] KIM B T, KIM N K, LEE W J, et al. Experimental load-transfer curves of laterally loaded piles in Nak-Dong River sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(4): 416-425.

[26] YANG Min, GE Bin, LI Weichao, et al. Dimension effect on p - y model used for design of laterally loaded piles[J]. Procedia Engineering,2016,143:598-606.

[27] ASHOUR M, HELAL A. Contribution of vertical skin friction to the lateral resistance of large-diameter shafts[J]. Journal of Bridge Engineering,2014,19(2):289-302.

(收稿日期:2022-08-06 编辑:胡新宇)

(上接第 126 页)

[17] HUANG D R, WANG G, DU C Y, et al. Seismic amplification of soil ground with spatially varying shear wave velocity using 2D spectral element method[J]. Journal of Earthquake Engineering,2019,25(14):2834-2849.

[18] POPESCU R, PREVOST J H, DEODATIS G, et al. Dynamics of nonlinear porous media with applications to soil liquefaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2006,26(6-7):648-665.

[19] LOPEZ-CABALLERO F, MODARESSI-FARAHMAND-RAZAVI A. Assessment of variability and uncertainties effects on the seismic response of a liquefiable soil profile[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2010,30(7):600-613.

[20] LUMB P. The variability of natural soils[J]. Canadian Geotechnical Journal,1966,3(2):74-97.

[21] 祁小辉. 考虑土体不均匀性的岩土工程可靠度分析[D]. 武汉:武汉大学,2015.

[22] WU Y X, ZHOU X H, GAO Y F, et al. Effect of soil variability on bearing capacity accounting for non-stationary characteristics of undrained shear strength[J]. Computers and Geotechnics,2019,110:199-210.

[23] WU Y X, GAO Y F. A modified spectral representation method to simulate non-Gaussian random vector process considering wave-passage effect[J]. Engineering Structures,2019,201:109587.

[24] WU Y X, LI R, GAO Y F, et al. Simple and efficient method to simulate homogenous multidimensional non-Gaussian vector fields by the spectral representation method[J]. Journal of Engineering Mechanics,2017,143(12):06017016.

[25] POPESCU R, PREVOST J H, DEODATIS G. Effects of spatial variability on soil liquefaction; some design recommendations[J]. Geotechnique,1997,47:1019-1036.

[26] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社,2013.

(收稿日期:2022-09-05 编辑:胡新宇)