

## 地震波类型对砂土震陷影响的数值模拟分析<sup>①</sup>

张海丘<sup>1,2</sup>, 高广运<sup>1,2</sup>, 王 禹<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**地震波是一种随机的、不规则作用的动荷载脉冲,可分为振动型和冲击型。不同类型的地震波会对砂土液化和变形等产生重要影响,而传统的砂土震陷计算方法往往忽视这种因素,只考虑最大加速度幅值。通过编写 UMAT 子程序,在非线性有限元软件 ABAQUS 中开发亚塑性砂土界面模型,对不同地震波类型下不同相对密度的砂土进行动单剪试验模拟,得到一系列砂土剪应变及竖向应变的时程曲线,并与室内试验结果进行对比分析。研究表明:在同一工况下,同类型的地震波引起的砂土竖向应变相近,不同类型引起的竖向应变差异明显;振动型地震波比冲击型引起的竖向应变更大。

**关键词:** 振动型地震波; 冲击型地震波; 动单剪试验; 砂土震陷

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 1-0095-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0563

## Numerical Simulations of the Impact of Different Types of Seismic Waves on the Seismic Compression of Sands

ZHANG Hai-qi<sup>1,2</sup>, GAO Guang-yun<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Earthquakes can result in huge losses of human life and property. According to extensive field surveys, a significant number of foundation failure cases are due to sand settlement, as foundation upsetting and cracking can be caused by large deformations or differential settlements. Seismic waves are a type of random and irregular dynamic pulse and have a great influence on the seismic settlement of sand. By setting the boundary value in a time history curve to 60% of the maximum peak acceleration, various seismic waves can be divided into two types: vibration-type waves, which have more than two wave crests within the boundary value, and impact-type waves. Different types of seismic waves have different effects on the liquefaction and compression of sand, possibly due to the problem of energy release. However, traditional methods for calculating the seismic settlement of sand neglect the different types of waves; they merely consider the maximum acceleration amplitude to simplify this complex problem by using an equivalent sinusoidal quantity. This simplification may cause larger errors during practical applications. In this paper, the nonlinear finite element software ABAQUS, which is a frequently used commercial software for numeric calculations, is used to develop a bounding surface hypoplasticity model for sand that includes a UMAT subroutine. The formulation of this constitutive model is based

① 收稿日期: 2015-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372271)

作者简介: 张海丘(1989-)男, 硕士研究生, 主要从事土动力学和地震工程的研究。

on the bounding surface plasticity theory, which a large number of laboratory experiments have proven to be effective in describing the cyclic behavior of sand. The dynamic simple shear test has a few advantages in assessing the seismic behavior of soil. Primarily, since it applies cyclic shear stresses onto horizontal planes and permits the continuous rotation of principal stress axes, this test replicates field loading conditions much more accurately than the cyclic triaxial test. By simulating the dynamic simple shear test using sand with different relative densities under different types of seismic wave loading, this paper studies the influence of wave type on the process of seismic settlement and the final settlement value, as well as the deformation of sand under earthquake loading. Finally, a series of time-history curves comparing shear strain versus vertical strain were obtained from this series of numerical experiments, and were compared with laboratory results. The main conclusions are as follows. The wave band prior to the maximum peak acceleration governs the controlling effect on seismic settlement; however, the left wave band also has an obvious influence when the peak value attains 80% of the maximum value under vibration-type seismic loading. An analogous experiment yielded similar compression results; under the same conditions but under the influence of different types of seismic waves, the compression results were disparate, as vertical strains caused by vibration-type seismic waves were greater than those caused by impact-type waves. By taking into account the wave type, this method is much more practical for the simulation of sand seismic settlement at actual sites. As the model parameters related to the dilatancy effect are constant, there is a certain amount of bias between the simulated and experiment results. Further research into these parameters is needed.

**Key words:** vibration-type wave; impact-type wave; dynamic simple shear test; seismic compression of sand

## 0 引言

近年来地震频发,调查显示由地震引起的结构破坏很大一部分是因震陷造成地基过大变形引起倾覆和开裂,或因差异沉降引起裂缝而影响结构的正常使用<sup>[1-2]</sup>。地震波是一种多维的随机荷载,其不规则等特性对砂土震陷有重要影响<sup>[3-4]</sup>。但有关砂土震陷的计算大多采用简谐荷载进行等效,忽略地震动特性的影响,如 Tokimatsu 和 Seed<sup>[5]</sup>、Youd<sup>[6]</sup>、Shahnazari 和 Towhata<sup>[7]</sup>、Duku 等<sup>[8]</sup>。

Ishihara 和 Yasuda<sup>[9]</sup>按照地震波的特性将其分为冲击型和振动型两种,对砂土液化问题展开研究。以不规则地震波时程曲线峰值的 60% 为分界值,在其峰值之间的各个波幅中,大于分界值的波幅数小于等于两个时,对应的地震波属于冲击型,其他则为振动型。谢定义和巫志辉<sup>[10]</sup>根据该方法,利用动三轴试验进一步研究了地震波类型对砂土液化的影响,指出该方法能够在一定程度上反映地震波的主要特征。孟凡超等<sup>[11]</sup>通过黏土和砂土的动三轴试验,研究土体永久变形中地震动的有效荷载问题,得到了砂土变形与地震波类型间的一些规律。陈青生等<sup>[12]</sup>利用有限元模拟动单剪试验,研究了地震荷

载不规则性对砂土震陷的影响,认为一些规范和方法中用等幅应力波作用的等效方法是不合理的。

为有效模拟砂土动力变形问题,本文在 ABAQUS 平台上对砂土界面模型进行二次开发,建立单向动单剪试验模型,输入不同类型的地震波,计算砂土的竖向应变,并与室内试验结果进行对比分析。

## 1 本构模型的二次开发

为了能很好地反映净砂在循环荷载下的力学行为,本研究采用 Wang<sup>[13]</sup>提出的亚塑性砂土界面模型。该模型为增量弹塑性本构模型,其基本应力应变关系分解为弹性应变部分和塑性应变部分。弹性应力应变速率关系为:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}^e &= \dot{\epsilon} + \frac{1}{3}(\text{tr}\dot{\epsilon}^e)I = \frac{1}{2G}\dot{s} + \frac{1}{3K}\dot{p}I \\ &= \frac{1}{2G}\dot{p}r + \left(\frac{1}{2G}r + \frac{1}{3K}I\right)\dot{p}\end{aligned}\quad (1)$$

其中: $e$  为偏应变张量; $p$  为平均有效应力,即  $p = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ ;  $r$  为偏应力比张量,即  $r = s/p$ ;  $I$  为二阶单位张量; $G$  和  $K$  是增量弹性剪切模量和体积模量。

塑性应力应变关系为:

$$\dot{\epsilon}^p = \left(\frac{1}{H_r}n_D + \frac{1}{3K_r}I\right)(p\dot{\gamma} : n_N) + \left(\frac{1}{H_p}r + \frac{1}{3K_p}I\right)h(p - p_m)h(\dot{p}) \quad (2)$$

其中,  $H_r$  和  $K_r$  是与  $\dot{\gamma}$  相关的塑性剪切模量和体积模量;  $H_p$  和  $K_p$  是与  $\dot{p}$  相关的塑性剪切模量和体积模量。

将式(1)和式(2)进行变换,得到用弹塑性刚度矩阵  $D^{eq}$  表达的应力应变关系

$$\dot{\sigma} = D^{eq} : \dot{\epsilon}$$

其中

$$D^{eq} = D^e - \frac{p^r \times Q^p - p^p \times Q^r}{A_r B_p - A_p B_r},$$

$$D_{ijkl} = K\delta_{ij}\delta_{kl} + G(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\delta_{kl}),$$

$$p^r = \frac{2G}{H_r}n_D + \frac{K}{K_r}I,$$

$$p^p = \left(\frac{2G}{H_p}r + \frac{K}{K_p}I\right)h(p - p_m)h(\dot{p}),$$

$$Q^r = A_p n_N - A_r I,$$

$$Q^p = B_p n_N - B_r I,$$

$$A_r = \frac{1}{2G} + \frac{1}{H_r}n_D : n_N,$$

$$A_p = \frac{1}{K_r},$$

$$B_r = \left[\frac{1}{2G} + \frac{1}{H_p}h(p - p_m)h(\dot{p})\right]r : n_N,$$

$$B_p = \left[\frac{1}{K} + \frac{1}{K_p}h(p - p_m)h(\dot{p})\right].$$

各参数的具体意义和求法见文献[13]。二次开发中采用的有限元计算方法为一致切线模量刚度法,积分方法为 Euler 向后隐式积分算法。费康<sup>[14]</sup>、Manzari<sup>[15]</sup>等曾验证了该方法的有效性及其适用性。

## 2 动单剪试验模型

根据动单剪试验仪器的基本原理,在 ABAQUS 中建立三维动单剪模型,如图 1 所示。该模型两端为刚性板,刚性板下侧内边缘为可以转动的固定边,钢板模拟盒式动单剪仪两侧可以扭动的钢板。土体侧面为侧向膨胀方向被固定,其他方向为自由边界,土体两侧没有变形,上侧施加覆盖荷载。

模型采用文献[16]中 Filter 砂土参数,具体数值见表 1 和表 2。

本次模拟采用的亚塑性砂土界面模型需要

15 个参数,分别为  $R_f, R_p, c, G_0, k, h_r, k_r, a, b, d_0, h, \lambda, \alpha, z_D, z_N$ ,具体含义参见文献[13]。参数的选取通过调参程序与室内试验结果进行对比来确定。为了方便起见,本次调参过程采用 20 次循环简谐荷载作用下剪应变分别为 0.4%、0.8%、1.2%、1.6% 的净砂竖向变形值进行对比分析。具体操作流程可参考文献[12],具体参数选取结果见表 3。

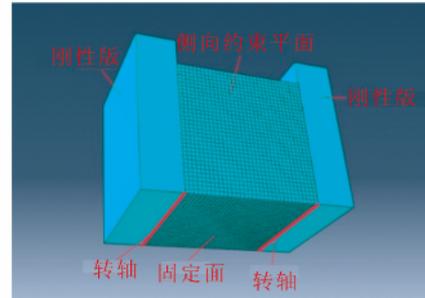


图 1 动单剪模型

Fig. 1 Dynamic simple shear model

表 1 美国 Filter 净砂物理性质指标

Table 1 Physical indices of Filter clean sand

$e_{max}$	$e_{min}$	$C_u$	$C_c$
0.9	0.68	1.93	0.96

表 2 不同相对密度砂土试样孔隙比与密度

Table 2 Void ratio and density of sand sample with different relative densities

$D_r/\%$	30	45	65	80
$e$	0.834	0.801	0.757	0.724
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1.445	1.471	1.508	1.537

按照 Ishihara 和 Yasuda<sup>[9]</sup>的波型划分方法,每种类型的地震波各选两条:振动型剪应变时程曲线为 SER000 和 LGP090;冲击型剪应变时程曲线为 D-OLC360 和 A-GRN180。具体波形参见文献[16]。

## 3 地震波类型对震陷过程的影响

在模型中输入上述地震荷载,得到竖向应变时程曲线并与室内试验结果进行对比分析,验证该数值方法的有效性,并分析波型对震陷过程的影响差异。试验结果曲线主要分为两种:(1)剪应变及其对应的竖向应变时程关系曲线;(2)竖向应变与剪应变的相互关系曲线。与文献[16]一致,取上覆荷载为 50 kPa、相对密度为 30% 的工况下各地震波对应的其中一组试验结果进行分析,如图 2~图 5 所示。

比较图 2(a)、图 3(a)可看出竖向应变时程曲

表3 相对密度不同的Silica#2砂土弹塑性界面模型参数

Table 3 Parameters of elasto-plastic bounding surface model for Silica #2 sand with different relative densities

相对密度/%	$\varphi/(\circ)$	$G_0$	$c$	$k$	$h_r$	$\lambda$	$d_0$	$R_p/R_f$	$K_r$	$a$	$b$	$\alpha$	$z_D$	$z_N$
30	30	105.2	0.80	0.010 3	0.268	0.016 5	0.82	0.75	0.500	1	2	0.08	0.5	0.90
45	30	109.3	0.83	0.007 2	0.268	0.014 9	0.93	0.75	0.060	1	2	0.12	0.55	0.93
60	30	113.5	0.85	0.006 9	0.268	0.012 7	1.02	0.75	0.010	1	2	0.16	0.6	0.98
80	30	117.4	0.87	0.005 5	0.400	0.0107	1.21	0.75	0.010	1	2	0.21	0.65	1.02

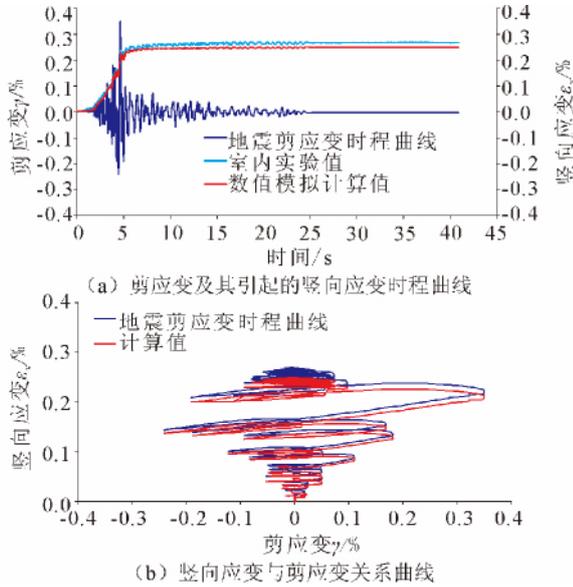


图2 冲击型D-OLC360剪应变地震荷载输入数值模拟结果与试验结果曲线

Fig. 2 Numerical simulation results and test results for inputting of seismic shear strain loading titled D-OLC360

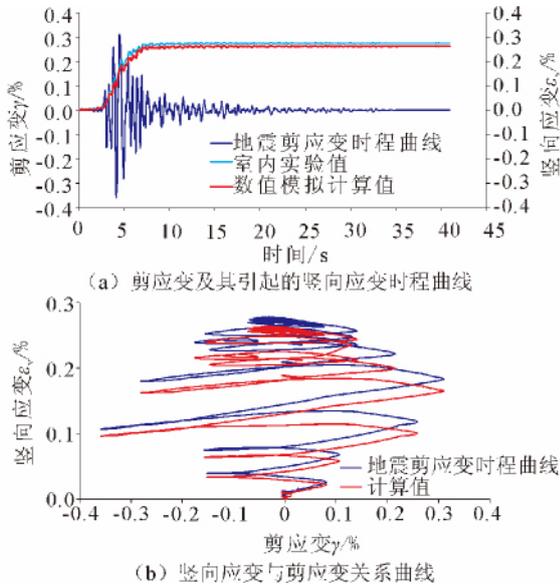


图3 冲击型A-GRN180剪应变地震荷载输入数值模拟结果与试验结果曲线

Fig. 3 Numerical simulation results and test results for inputting of seismic shear strain loading titled A-GRN180

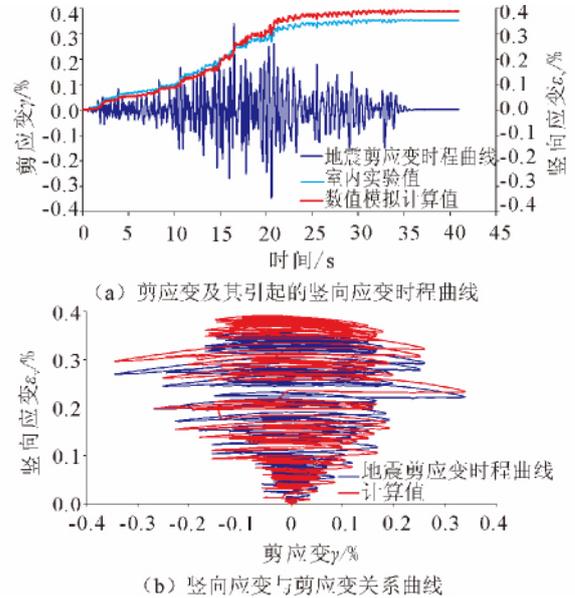


图4 振动型SER000剪应变地震荷载输入数值模拟结果与试验结果曲线

Fig. 4 Numerical simulation results and test results for inputting of seismic shear strain loading titled SER000

线的模拟值和试验值相接近。当砂土受到冲击型地震荷载作用时,最大峰值及其之前的波段对砂土竖向变形起控制作用,引起的竖向应变占总竖向应变的85%以上。从图2(b)、图3(b)中也可以看出,砂土的竖向应变主要是由最大峰值及其之前的波段引起的,而且最大峰值对应的波段引起的砂土竖向应变最大。这在竖向应变时程曲线上表现为:在地震波最大峰值作用之前曲线较陡;之后曲线则较平缓。

同样,从图4(a)、图5(a)可以看出,振动型地震荷载作用下砂土竖向应变的模拟值要比试验值大10%左右。这主要是由于振动型地震波的输入能量大,而该本构中控制剪胀(缩)的系数 $h_r$ 、 $d_0$ 、 $\alpha$ 是常数,实际上应与相对密度相关,因此引起一定的差值。尽管如此,由于砂土试样在地震荷载作用下相对密度的变化不大,其变形规律仍与试验值相吻合。与前面类似,最大峰值及其之前的波段对竖向应变同样起着控制作用;而对于之后的波段,当峰值等于最大峰值的80%左右时,其对竖向应变仍具有一定的影响,当

峰值较小时地震波对砂土竖向应变几乎没有影响。为此,最大峰值前后一定范围内的波段对砂土竖向应变起控制作用,对应竖向应变增长较快,其时程曲线较陡;此后的波段对竖向应变影响不明显,对应的竖向应变增长较缓,其时程曲线相对平缓。从图 4(b)、图 5(b)中也可以看出,砂土受振动型地震荷载作用时,最大峰值前后一定范围内的地震波共同决定着砂土竖向应变的大小,而最大峰值之后的地震波,其峰值应达到最大峰值的 80%左右才对砂土竖向应变具有一定的影响。

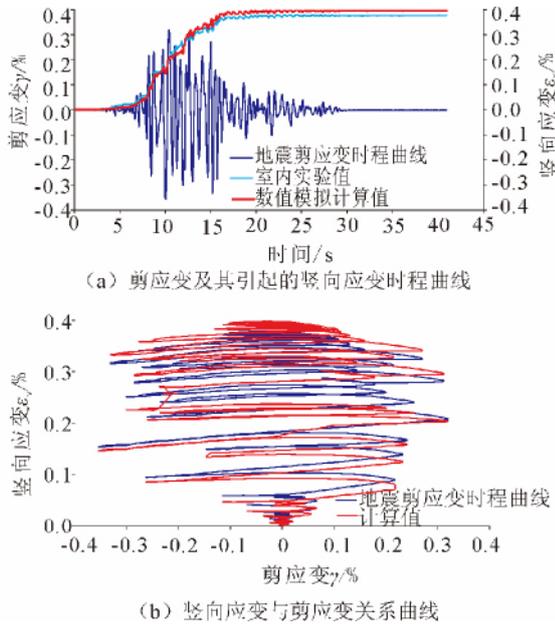


图 5 振动型 LGP090 剪应变地震荷载输入数值模拟结果与试验结果曲线

Fig. 5 Numerical simulation results and test results for inputting of seismic shear strain loading titled LGP090

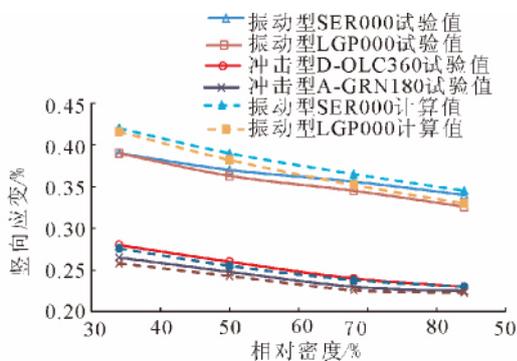


图 6 不同工况不同类型地震波作用引起的砂土竖向应变

Fig. 6 Vertical strains in sands due to different types of seismic waves under different work conditions

#### 4 地震波类型对震陷值的影响及变形机制分析

对不同相对密度的砂土进行单剪模拟试验,并与室内试验结果对比,如图 6 所示。由图可知,当相对密度较小时,竖向应变模拟值与试验值相差较大;反之则相差较小。这仍然是由于控制剪胀(缩)的系数是常数。真实试样在地震荷载作用下,相对密度较小时其变化范围较大,引起的剪胀系数变化较大;而相对密度较大则其范围相对较小,引起的剪胀系数差异较小。但是从总体上来说,试样的相对密度变化幅度较小,对变形的影响也较小。

从图中我们还能得到砂土在地震作用下的变形规律。相同工况下,同类型地震波引起的砂土竖向应变较为接近,不同类型的地震波引起的竖向应变差异较大,振动型比冲击型引起的竖向应变更大。这是由于砂土的震陷变形与荷载频率关系不大,而主要是受荷载幅值和往返作用次数的影响<sup>[4]</sup>。在峰值相同的情况下,振动型地震波中幅值较大的脉冲次数较多,因此对砂土颗粒重排列的影响较大,变形也较大;相反,冲击型中幅值较大的脉冲次数较少,对砂土颗粒重排列的影响较小,变形也较小。

#### 5 结论

(1) 当砂土受到冲击型地震荷载作用时,最大峰值以及其之前的地震波对砂土竖向变形起主要控制作用,引起的竖向应变占总竖向应变的 85%以上,最大峰值之后的地震波对砂土竖向应变的贡献小。

(2) 当砂土受到振动型地震荷载作用时,最大峰值之前的各地震波对砂土竖向应变同样起着控制作用;而对于最大峰值之后的地震波,当峰值大于等于最大峰值 80%左右时,这些地震波对砂土竖向应变仍具有显著影响,当峰值较小时地震波对砂土竖向应变几乎无影响。

(3) 在同一相对密度和上覆荷载作用下,同类型的地震波引起的砂土竖向应变相近,不同类型的地震波作用引起的竖向应变差异明显;振动型地震波比冲击型引起的竖向应变更大。

(4) 由于该亚塑性砂土边界模型与剪胀(缩)相关的参数为常数,不能随相对密度进行变化,因此模拟结果与试验结果有一定的偏差。以后的研究工作可以对剪胀(缩)相关的参数进行修正。

## 参考文献(References)

- [1] NAGASE H, ISHIHARA K. Liquefaction-induced Compaction and Settlement of Sand During Earthquakes[J]. Soil and Foundations, 1988, 28(1): 65-76.
- [2] 王兰民, 吴志坚. 岷县漳县 6.6 级地震震害特征及其启示[J]. 地震工程学报, 2013(3): 401-412.
- [3] 袁晓铭, 孙锐, 孟上九. 土体地震大变形分析中 Seed 有效循环次数方法的局限性[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 207-211.
- [4] 孟凡超, 袁晓铭, 孙锐. 加速度峰值不对称性特征及其影响[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 191-196.
- [6] Youd T L. Compaction of Sands by Repeated Shear Straining[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, 98(7): 709-725.
- [7] Shahnazaril H, Towhata I. Torsion Shear Tests on Cyclic Stress-dilatancy Relationship of Sand[J]. Soils and Foundations, 2002, 42(1): 105-119.
- [8] Duku P M, Stewart J P, Whang D H, et al. Volumetric Strains of Clean Sands Subject to Cyclic Loads[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(4): 364-368.
- [9] Ishihara K, Yasuda S. Sand Liquefaction Under Random Earthquake Loading Condition[C]//Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, ASCE, 1973: 329-338.
- [10] 谢定义, 巫志辉. 不规则动荷载脉冲波对砂土液化特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(4): 1-12.
- [11] 孟凡超, 袁晓铭, 孙锐, 等. 土体永久变形中地震动有效荷载研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(5): 170-178.
- [12] 陈青生, 高广运, 何俊峰. 地震荷载不规则形对砂土震陷的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3713-3720.
- [13] WANG Z L. Bounding Surface Hypoplasticity Model for Granular Soils and its Application[D]. California; University of California, 1990.
- [14] 费康, 刘汉龙. 边界面模型在 ABAQUS 中的开发应用[J]. 解放军理工大学学报, 2009, 10(5): 447-451.
- [15] M T Manzari, M A Nour. On Implicit Integration of Bounding Surface Plasticity Models[J]. Computers and Structures, 1997, 63(3): 385-392.
- [16] 陈青生, 熊浩, 高广运. 地震荷载特征及其对砂土震陷影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 657-664.