

自由液化场加速度反应数值试验

何剑平¹, 陈卫忠²

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 场地液化除引起场地失稳和沉降外, 也会对场地加速度反应产生重要作用。基于 Finn 模型实现自由场液化数值模拟试验, 研究典型液化场加速度反应问题。研究表明: 液化场加速度反应幅值与输入加速度幅值有关, 液化场加速度放大倍数随输入地震动的增大而减小; 液化场加速度反应大小与输入频率有很大关系, 可液化场加速度反应的频率特征为: 低频输入加速度反应幅值放大、高频输入反应幅值缩小, 低频强化效应明显大于高频弱化效应; 干砂弹性场也有低频放大高频滤波效应, 但没有液化场显著; 对于低频激振, 若可液化场加速度经过放大且场地发生液化, 场地加速度则衰减, 若可液化场加速度经过放大但场地仍然未液化, 场地加速度则维持稳态受迫振动状态; 弹性场加速度反应从下到上逐渐增大, 地表面放大最显著, 液化场加速度放大在场地腰部最显著; 高幅值输入易掩盖液化场加速度反应频率特性, 低加速度幅值、低频输入下液化场的频率特性较明显。液化场地下结构抗震设计采用常规弹性场加速度反应系数, 则会导致地下结构处于不安全状态。研究成果为液化场地下结构动力分析提供理论及试验基础。

关键词: 土力学; 液化; 超孔压比; 加速度放大

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)增 1 - 3130 - 08

NUMERICAL EXPERIMENT OF ACCELERATION RESPONSE IN FREE LIQUEFACTION FIELD

HE Jianping¹, CHEN Weizhong²

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Soil liquefaction would make ground failure and have effect on ground acceleration in addition. The liquefaction numerical simulation experiment of free field by the Finn model is realized; and the acceleration response question of liquefaction field has been studied. The study results indicate that: the liquefaction field acceleration response amplitude has relations with input acceleration amplitude, the acceleration magnification factor in liquefaction field decreases along with the increasing input seismic amplitude. The acceleration response essential feature of liquefaction field is low-frequency amplification, high-frequency reduction, the low-frequency amplification effect is higher than the high frequency reduction effect obviously. The dry sand elastic field also has the low-frequency amplification and high-frequency filter effect, but the effect of liquefaction field is more remarkable than that of elastic field. Regarding the low frequency excitation, if the liquefaction field acceleration enlarges, and the field have liquefied, then the field acceleration weakens. If the liquefaction field acceleration enlarged, but the field had still not liquefied, then the field acceleration maintained the stable forced oscillation condition. The elastic field acceleration response increased gradually from field bottom to top, the acceleration magnification in

收稿日期: 2011 - 03 - 15; **修回日期:** 2011 - 06 - 20

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(50720135906); 国家自然科学基金资助项目(41072238, 51009133)

作者简介: 何剑平(1960 -), 男, 1984 年毕业于包头钢铁学院工程民用建筑专业, 现为博士研究生、高级工程师, 主要从事结构抗震试验方面的研究工作。E-mail: hejianping@sdu.edu.cn

field surface is most remarkable, the acceleration magnification of liquefaction field is most remarkable in the field middle spot. The acceleration response frequency characteristic is not bright with high amplitude input, the liquefaction field acceleration response frequency characteristic is quite obvious with the low acceleration amplitude and low frequency input. If the acceleration magnification factor in conventional elastic field is used to anti-seismic design of underground structure, it will lead the underground structure to be unstable. Research results will provide a theoretical and experimental basis for the dynamic analysis of underground structures passing through liquefied soil layer.

Key words: soil mechanics; liquefaction; excess pore water pressure ratio; acceleration magnification

1 引言

地震作用下场地大规模的液化将改变土层自振特性, 液化对地震动特性产生重要影响, 液化场地地震加速度反应与弹性场有不同, 液化场加速度反应有其特殊规律, 液化场的这种特殊地震反应现象已被很多震害调查及一些地震记录所证实。

黄雨等^[1]采用 EduShake 软件, 研究了场地地面峰值加速度等于 0.1 g 的情况下, 上海软土地表峰值加速度具有放大特性。吕西林等^[2]用振动台模型箱进行自由液化场常规试验, 结果表明, 砂土对地震动可起滤波和隔震作用。孙锐和袁晓铭^[3]采用液化场实际地震记录和任选的非液化场地地震记录对比的方法, 与理论分析相结合, 研究了典型液化场地对地表加速度反应谱的影响问题。

以往的抗震设计基本上没考虑液化对地震动的影响, 不管场地是否液化, 设计地震影响系数不变。场地液化对场地加速度反应的影响, 尚缺少成熟的研究结果, 抗震规范也无法做出规定。

液化场地地震反应研究还缺乏一个全面的认识, 本文基于 Finn 模型采用 FLAC^{3D} 对自由场液化进行系列数值模拟试验, 系统研究了液化对场地加速度反应影响的 4 个问题: (1) 分析液化过程中加速度反应衰减特性; (2) 通过不同频率激振加速度反应试验, 验证液化场低频放大高频滤波效应; (3) 对照干砂弹性场加速度反应试验结果, 讨论液化场加速度反应竖向分布规律; (4) 验证液化场加速度放大倍数随输入地震动的增大而减小这一现象。总结液化场加速度反应的特殊性, 发现液化土层对地震动的影响规律, 为特殊场地的抗震设计提供相应的地震动修正参数。

2 应变动孔压模型与土体的液化

2.1 动孔压模型与土体的液化

Finn 模型是一种应变模型, 其实质是在 Mohr-Coulomb 模型的基础上增加了动孔压计算公式。P. P. Martin 和 H. B. Finn^[4]假定动孔压的上升与塑性体积应变增量有关, 根据地震时饱和土体积变化的相容条件, 建立了一个饱和土振动孔隙水压力增量的基本公式。往返剪切作用引起的土的永久体积压缩、孔隙水的排出和有效静正应力降低引起的土体积回弹三者之间的体积变化满足相容条件^[5]。则存在:

$$\Delta\varepsilon_{vd} + \Delta\varepsilon_{vr} = \Delta\varepsilon_{vr} \quad (1)$$

式中: $\Delta\varepsilon_{vd}$ 为每次剪切循环引起的土的体积压缩增量, $\Delta\varepsilon_{vr}$ 为每次剪切循环作用排出的孔隙水的体积增量, $\Delta\varepsilon_{vr}$ 为有效静正应力降低引起的土的体积回弹增量。

假定在地震的瞬间饱和和砂土不发生排水, 这样 $\Delta\varepsilon_{vr} = 0$ 。因此式(1)可写成:

$$\Delta\varepsilon_{vd} = -\Delta\varepsilon_{vr} \quad (2)$$

每次循环, 剪切作用引起的孔隙水压力和土的有效静正应力的变化分别为 Δu 和 $\Delta\sigma$, 则有

$$\Delta\varepsilon_{vr} = \frac{\Delta\sigma}{E_r} = \frac{-\Delta u}{E_r} \quad (3)$$

式中: E_r 为饱和和砂土的回弹模量。

将式(3)代入式(2), 则有

$$\Delta u = E_r \Delta\varepsilon_{vd} \quad (4)$$

在排水试验条件下无法测定 E_r 和 $\Delta\varepsilon_{vr}$, 可以用排水试验得到的 $\Delta\varepsilon_{vd}$ 来估算不排水条件下的 $\Delta\varepsilon_{vd}$ 。排水单剪试验表明, $\Delta\varepsilon_{vd}$ 为剪应变幅值的函数, 与有效竖向应力无关, 这种体应变增量是由粒间的滑移所引起, 它应该和不排水试验条件下同样剪应变幅值时粒间滑移引起的体积应变增量相等。

根据 G. R. Martin 等^[6-7]对于干砂的动三轴试验结果, $\Delta\varepsilon_{vd}$ 可按下面的经验公式表示为

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + \frac{C_3 \varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{vd}} \quad (5)$$

式中： γ 为第 N 次循环剪应变幅值， ε_{vd} 为体积应变积累量。对于相对密度为 45% 的结晶二氧化硅砂试验参数： $C_1 = 0.80$ ， $C_2 = 0.79$ ， $C_3 = 0.45$ ， $C_4 = 0.73$ 。

设体积应变积累量与剪应变幅值的比值为 $x = \varepsilon_{vd} / \gamma$ ，体积应变增量与剪应变幅值的比值为 $y = \Delta \varepsilon_{vd} / \gamma$ ，则有更简捷的关系式：

$$y = C_1(1 - C_2 x) + \frac{C_3 x^2}{1 + C_4 x} \quad (6)$$

孔隙水压力的应变模型直接和动力分析中的应变幅值联系起来，是目前孔隙水压力研究的一个重要方向^[8]。

2.2 饱和砂土液化的判定准则

饱和砂土液化时其抗剪强度为 0，把这个液化特征表示为液化土广义剪应力 q 和有效球应力 p 的定义，则有

$$\left. \begin{aligned} q &= \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2} = 0 \\ p &= \frac{1}{3} (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) = 0 \end{aligned} \right\} (7)$$

满足式(7)的解只能是

$$\sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3 = 0 \quad (8)$$

式中： $\sigma'_i (i = 1, 2, 3)$ 为液化时的 3 个有效主应力。根据有效应力原理，式(8)可改写为

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = u \quad (9)$$

式中： u 为液化时的孔隙水压力。这表明，当有效应力均为 0 时，作用在土单元 3 个方向的总主应力等于该时刻的孔隙水压力时，饱和砂土发生液化。

在数值分析中常用超孔压比的概念来描述液化。在三维数值计算中超孔压比 ppr 的定义为

$$ppr = 1 - \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}} \quad (10)$$

式中： σ'_m ， σ'_{m0} 分别为动力计算过程中和计算前单元的平均有效应力，分别定义^[9]为

$$\sigma'_m = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) / 3 \quad (11)$$

$$\sigma'_{m0} = (\sigma'_{10} + \sigma'_{20} + \sigma'_{30}) / 3 \quad (12)$$

式中： σ'_{10} ， σ'_{20} ， σ'_{30} 为动力计算之前的应力张量的 3 个主应力； ppr 为超孔压比，反映液化程度大小， $ppr = 1$ 表示完全液化。本文用 Fish 语言编写应用程序记录土多项动力反应历程。

3 液化场加速度反应数值试验

3.1 液化场数值试验基本模型

取自由场长高厚分别为 30，12，1 m，动力分析边界条件： y 向位移为 0，将其视为平面应变问题。阻尼采用局部阻尼，阻尼系数 0.314。模型外侧施加无限自由边界。液化土计算模型采用 Finn 模型。初始侧压力系数 1，水的压缩模量 20 MPa，水密度 1 000 kg/m³。

在场地左右两侧面及底面水平向施加动荷载。动荷载包括正弦速度波和地震波。正弦速度波考虑地震波的波形，从 0~1 s 速度逐渐增大到最大值，1~6 s 振幅稳定，6~7 s 速度振幅逐渐减小到 0，速度幅值对应于加速度幅值 0.1 g~0.3 g。地震波有：El Centro 地震波、Kobe 地震波、唐山地震波及广州波，El Centro 地震波、Kobe 地震波、唐山地震波均为 II 类场地上的长周期波，波的卓越频率分别为 1.3，0.9，0.8 Hz。广州地震波为 I 类场地上的短周期波，波的卓越频率为 16.5 Hz。本文用不同频率的波检验可液化场地加速度反应频率特性。

表 1 砂土物理力学参数

土样	土模型	体积模量/Pa	剪切模量/Pa	干密度/(kg·m ⁻³)	内摩擦角/(°)
松砂	Finn	3×10 ⁷	1×10 ⁷	2 000	35

表 2 可液化土动力分析参数

土样	水模型	渗透系数/(m ² ·Pa ⁻¹ ·s ⁻¹)	孔隙率	阻尼系数	土模型
松砂	fl_iso	1×10 ⁻⁸	0.5	0.314	Finn

图 1 为本文无限自由边界自由场单元模型，场地内为饱和松砂，两侧为自由边界，数字表示加速度记录点位置及代号。

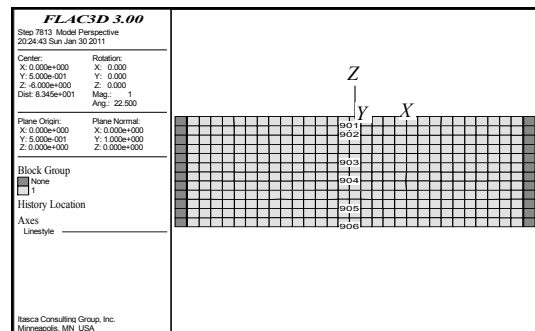


图 1 自由场液化数值试验单元模型及检查记录点布置图
Fig.1 Unit model and inspection point arrangement for liquefaction numerical experimentation in free field

用 0.03 g 幅值加速度白噪声激振 Finn 模型可液化场, 分析场地加速度反应频谱, 测试液化场的初始卓越频率, 测得检测点在低频范围的第一自振频率为: 1.87(点 901), 1.55(点 902), 1.53(点 903), 1.31(点 904), 0.81(点 905), 0.55 Hz(点 906)。

3.2 液化隔振特性数值试验

液化场加速度反应是液化场动力反应的一部分, 本文进行的自由场液化数值试验, 从自由场液化基本特性出发剖析液化场加速度反应规律。在场地左右两侧面及底面水平向加正弦速度波, 加速度幅值 0.3 g, 振动频率 5 Hz。

图 2 为自由场松砂液化试验中线点 903 超孔压比时间历程及该点水平加速度历程, 从图 2 中看出 *ppr* 值从 0 开始, 逐渐增大, 后期接近 1.0, 表明砂土完全液化。

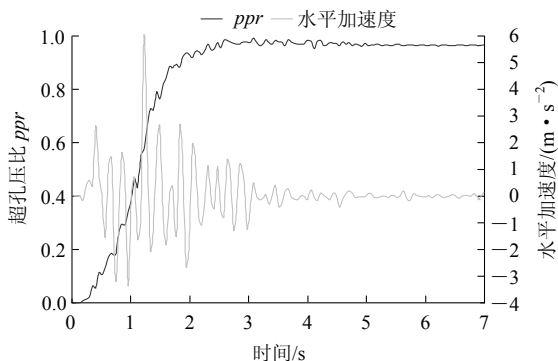


图 2 液化隔振过程水平加速度与超孔压比对照图

Fig.2 Comparison of time-history curves of *ppr* and horizontal acceleration in the liquefaction test

对照液化度(超孔压比)与加速度反应历程发现: 在液化过程中当液化度大约达到初始液化度时加速度开始衰减, 液化度小于初始液化度, 场地不液化, 加速度不衰减。加速度振幅衰减与液化发生时间上完全对应, 液化是加速度衰减的一个分水岭。

记录检测点的速度、位移历程, 发现砂土液化后, 其速度、位移振幅也都衰减趋于 0, 但达到液化状态时有不可恢复残留水平位移值。

由场地体积应变增量历程看出, 液化过程就是土体体积压应变不断积累的过程。记录场地有效应力历程, 知液化过程中土体有效应力不断降低逐渐趋于 0。场地表层土初始压力小、早液化, 底部土初始压力大从而晚液化。

以上这些特性是砂土液化特性从不同角度的反映, 这种特性也称液化土的隔振效应, 该隔振效应试验结果与离心机试验结果^[10]完全相符。

3.3 激振幅值对液化场加速度反应影响数值试验

液化场的加速度反应除了主要受输入频率影响以外, 还受输入加速度幅值本身的次要影响, 本文进行 5 Hz 频率不同幅值输入试验, 试验条件同上, 考察砂土的液化程度和加速度反应, 试验结果见表 3。

表 3 不同幅值输入液化场、弹性场加速度放大倍数对照表
Table 3 Comparison of acceleration response enlargement factors of liquefied field, elastic field

序号	加速度幅值/g	频率/Hz	输入波型	加速度放大倍数	
				液化场	弹性场
1	0.025	5	正弦波	1.511	1.660
2	0.050	5	正弦波	1.535	1.674
3	0.100	5	正弦波	2.081	1.668
4	0.200	5	正弦波	1.499	1.662
5	0.300	5	正弦波	1.318	1.662
6	0.400	5	正弦波	1.345	1.563
7	0.500	5	正弦波	1.157	1.666
8	0.600	5	正弦波	1.006	1.662
9	0.700	5	正弦波	0.973	1.651
10	0.800	5	正弦波	0.995	1.654

图 3 为不同输入加速度幅值、5 Hz 输入频率下, 场地中线底部点 905 超孔隙水压力比时程, 可见低加速度输入场地未液化, 超孔压比接近 0.4; 高加速度输入液化很充分, 超孔压比接近 1。可见液化需要一定的能量输入才发生。地震能量小, 只在场地表面产生液化能量大, 则场地深部也可产生液化。

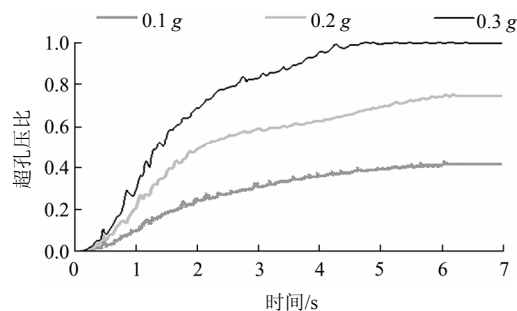


图 3 不同加速度幅值输入时超孔压比时程对比

Fig.3 Comparison of *ppr* time-histories in liquefaction field with different acceleration amplitudes input

图 4 为 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g 幅值正弦波输入、场地中线点 902 水平加速度历程, 由图 4 可知: 0.1 g 激振场地未液化, 加速度幅值基本不衰减, 场地加速度反应为稳态受迫振动状态。0.2 g, 0.3 g 激振场地液化, 加速度幅值衰减; 0.2 g 输入场地加速度幅值在 2.8 s 时衰减为 0, 0.3 g 输入场地加速度幅

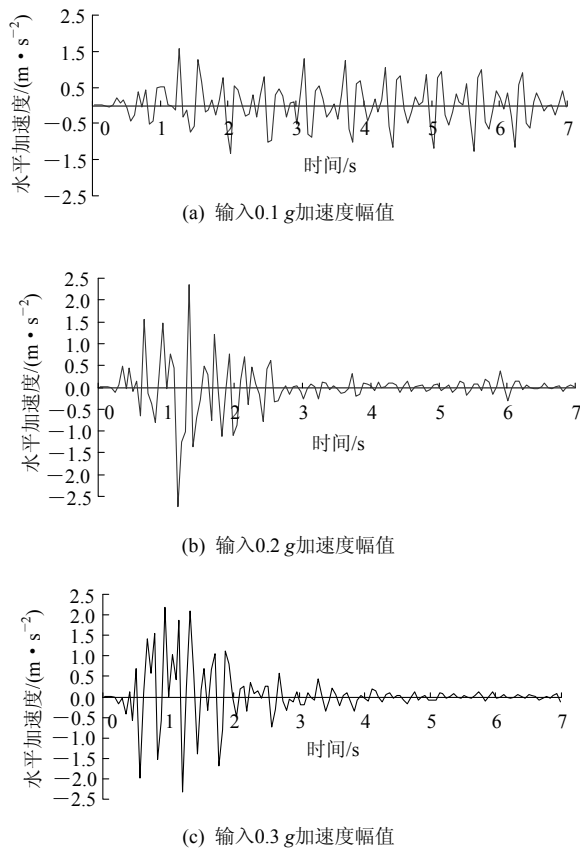


图4 不同加速度幅值输入时液化场水平加速度反应历程
Fig.4 Time-histories of horizontal acceleration response in liquefaction field under input different acceleration amplitudes

值在 2.0 s 时衰减为 0。

场地液化需要一定能量输入才能发生，加速度衰减是液化的伴随反应，可液化场输入地震加速度幅值高则场地液化早，加速度反应衰减也早。激振加速幅值度小，场地液化晚，加速度反应衰减晚。输入地震加速度幅值小于一定值，场地加速度反应幅值不衰减，维持稳定受迫振动状态。场地没有液化加速度反应则不衰减。

表 3 显示输入频率 5 Hz 不变，输入加速度幅值从 0.025 g 到 0.800 g 变化，液化场竖轴上部 5 个点(点 901~905)的平均加速度放大倍数变化趋势。液化场在 0.1 g 输入下加速度反应平均放大系数最大，达 2.081。输入加速度幅值高于 0.1 g，液化场加速度放大倍数随输入地震动的增大而减小。输入加速度幅值高于 0.6 g，加速度反应平均放大系数小于 1，可见液化场对强震有减震作用。这一试验结果与黄雨等^[1]用 EduShake 软件得到的上海软弱土地震特征计算结论一致。

3.4 激振频率对液化场加速度反应影响数值试验

在自由液化场边界输入加速度幅值为 0.1 g，频率分别为 1, 2, 5 Hz 的变幅正弦波，其他条件不变，考察液化场的液化程度、水平位移及加速度反应。

图 5 显示，在 0.1 g 加速度幅值不同频率激振下，场地中线上点 904 超孔压比历程可知：5 Hz 输入超孔压比最低，孔隙水压最小；1 Hz 输入超孔压比高，水压大；2 Hz 输入时的超孔压比、水压位于 5 和 1 Hz 频率输入时的超孔压比、水压之间。

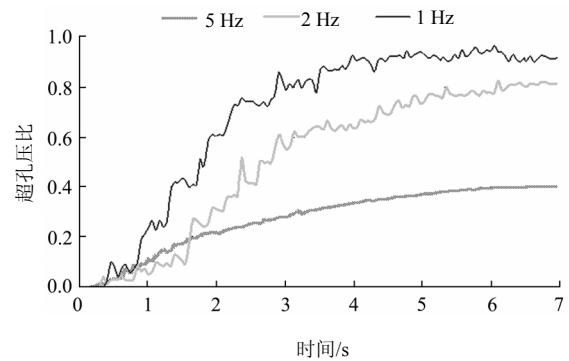


图 5 不同频率激振时场地超孔压比时程对比
Fig.5 ppr time-history liquefaction tests with different frequency excitations

试验也发现在 0.1 g 低加速度幅值输入下，1 Hz 输入，场地中线上 6 个点的平均液化程度较高，且场地下部的液化度大于场地上部。5 Hz 输入，场地中线上 6 个点的平均液化程度较低，只有地表点 901 液化，其他点均未液化，场地液化度从上至下逐渐降低。可见在低加速度幅值输入下，低频激振场地底部液化程度高，高频激振场地顶部液化程度高^[11]，低频波更易诱发场地液化。

图 6 为激振场地最大水平位移竖向分布图，不同频率输入，场地动力反应完全不同。由图 6 可见，

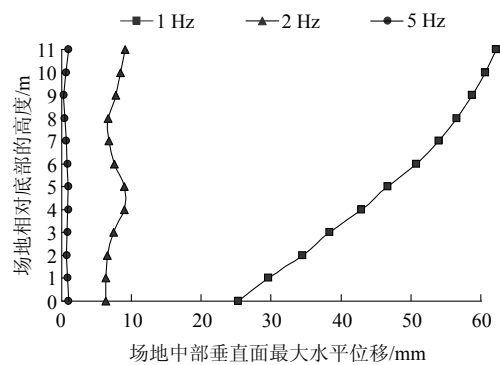


图 6 不同频率激振场地最大水平位移竖向分布
Fig.6 Vertical distribution of field maximum horizontal displacement with different frequency excitations

1 Hz 频率激振, 场地位移振幅较大, 振型简单; 2 Hz 频率激振, 位移振幅较小, 振型较复杂; 5 Hz 频率激振, 位移振幅更小, 场地几乎不振动。可见饱和和松砂对高频波有滤波作用, 液化场在初始液化前也有类似于弹性场性质: 高频输入激发高振型振动, 低频输入激发低振型振动。

在 0.1 g 低加速度幅值、1 Hz 低频激振下, 场地水平位移呈现剪切型变形特征, 与弹性场第一振型曲线相似。

图 7 为 0.1 g 加速度幅值、频率分别为 1, 2, 5, 15 Hz 正弦波输入下, 场地中线最大加速度反应竖向分布图。由图 7 可清晰地看出, 随着频率加大加速度反应值减小, 15 Hz 正弦波输入下场地内加速度反应均小于输入值, 可见高频激振场地内加速度缩小。低频激振加速度放大显著, 场地内最大加速度反应是底部输入的 11 倍, 顶部水平加速度反应是底部输入的 5.31 倍。

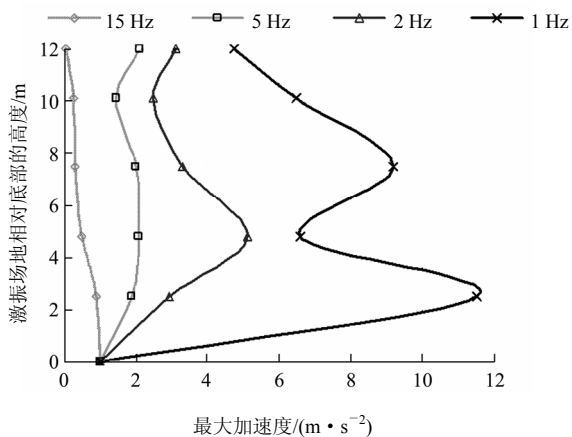


图 7 不同频率输入时液化场最大加速度反应分布

Fig.7 Maximum horizontal acceleration response distribution under the different frequencies input in liquefaction field

液化场与弹性场的频率特性有不同。弹性场自振频率不会改变, 可液化场在初始阶段有自身的初始卓越频率, 随着液化场塑性变形逐渐加大, 液化场的自振频率有所减小。可液化场对接近自振频率的低频波放大显著, 对远超过自振频率的高频波有滤波效应。液化场加速度反应的基本特征为低频放大、高频缩小。

液化场加速度放大竖向分布特征是下腰部放大最显著, 这一点与吕西林等^[2]用振动台试验的液化场加速度反应特点一致。

图 8 为 0.1 g 加速度幅值、频率分别为 1, 2, 5 Hz 正弦波激振下, 场地中线上地表检测点 901 水平

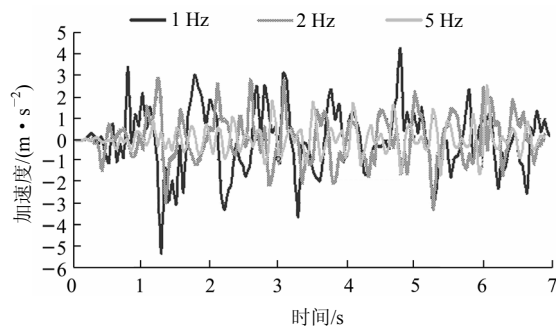


图 8 不同频率激振时场地水平加速度反应历程

Fig.8 Acceleration time-history in liquefaction field under different frequency excitations

加速度历程。图 8 表明: 5 Hz 激振加速度反应幅值基本不变, 加速度幅值最大放大 2 倍; 2 Hz 激振加速度反应幅值大体不变, 加速度幅值最大放大 3 倍; 1 Hz 激振加速度反应幅值先大后小, 加速度幅值最大放大 5 倍。

3.5 液化场及弹性场加速度反应频率特性对比

液化场的动力反应与弹性场相比既有联系又有区别, 液化场初始阶段同样存在一个动力放大问题, 即共振问题, 由于孔隙水压力的存在, 水与土体的耦合作用, 使液化场的共振问题变得扑朔迷离。为了清晰对比起见, 进行低幅值输入, 液化场、弹性场动力反应对比试验, 考察 2 种场地的加速度反应频率特性、加速度反应竖向分布及历程的区别。

弹性场土质为干砂, 干砂本构模型为弹性模型, 场地没有地下水, 其他场地尺寸、边界条件、荷载相同, 假定土性参数不变。

为了得到液化场加速度反应的普遍规律, 本文除了不同频率变幅正弦波试验以外, 还进行地震波试验, 地震波的频带更宽, 含有高、低频成分, 进一步检验液化场的频谱特性。

表 4 为液化场、弹性场中轴上除底部外其他 5 个点(点 901~905)水平加速度放大倍数平均值统计对照表。将表 4 试验结果绘成频率与场地加速度放大倍数平均值关系曲线见图 9。由图 9 可以看出, 可液化场加速度反应的基本特征为低频放大、高频缩小, 可液化场地的低频加振效应明显大于高频减振效应^[3]。干砂弹性场加速度反应也有低频放大、高频缩小的效应, 但反应不如液化场那么强烈, 液化场高频滤波(振幅减小)的效应大于弹性场, 液化场低频放大(振幅放大)的效应也大于弹性场。可液化场的卓越频率比弹性场低, 本试验液化场加速度最大反

表 4 液化场、弹性场加速度反应放大倍数对照表

Table 4 Liquefied field, elastic field acceleration response magnification factor comparative table

序号	加速度幅值/g	频率/Hz	输入波型	加速度放大倍数	
				液化场	弹性场
1	0.1	20.00	正弦波	0.164	0.382
2	0.1	15.00	正弦波	0.403	0.597
3	0.1	10.00	正弦波	0.766	0.690
4	0.1	5.00	正弦波	2.081	1.087
5	0.1	2.00	正弦波	3.834	1.541
6	0.1	1.50	正弦波	5.666	5.222
7	0.1	1.00	正弦波	8.459	3.365
8	0.1	0.50	正弦波	9.138	3.167
9	0.1	0.25	正弦波	4.759	2.466
10	0.1	-	El Centro 地震波	4.939	2.604
11	0.1	-	Kobe 地震波	4.392	3.246
12	0.1	-	唐山地震波	5.627	2.784
13	0.1	-	广州地震波	0.835	0.921

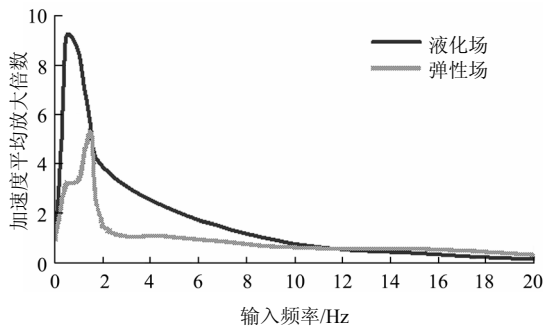


图 9 加速度放大倍数均值与输入频率关系曲线图

Fig.9 Relation curve of acceleration magnification factor and input frequency

应位于 0.5 Hz，弹性场加速度最大反应位于 1.5 Hz。

表 4 也显示：(1) 高卓越频率广州地震波输入，场地加速度反应平均放大倍数为 0.835，说明液化场的高频滤波效应，而且也再一次说明液化场的高频滤波效应略比弹性场强；(2) 低卓越频率的 Kobe、El Centro、唐山地震波输入，加速度放大显著，且液化场的低频放大效应比弹性场大。

图 10 为 0.1 g 加速度幅值、1 Hz 正弦波输入下，液化场及弹性场中轴上最大加速度反应竖向分布图。由图 10 可以看出，弹性场加速度竖向分布从下到上逐渐增大，加速度上部放大最显著，场地变形呈现剪切变形特征。液化场加速度反应特点是腰部大两头小。

图 11 为 0.1 g 加速度幅值、1 Hz 正弦波输入下，液化场、弹性场中轴上点 903 加速度反应历程图。由图 11 可以看出，弹性场加速度反应开始随输入加速度增大而增大，当输入加速度振幅不变时，

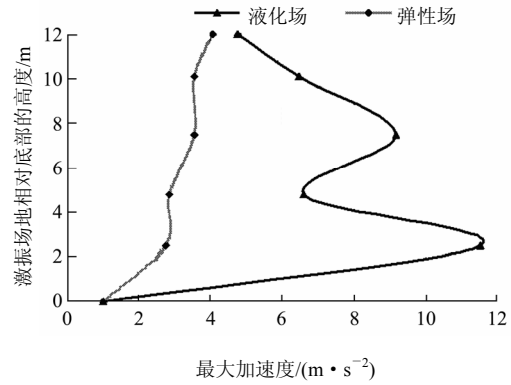


图 10 液化场、弹性场最大加速度竖向分布图

Fig.10 Acceleration response distribution in liquefaction field and elastic field

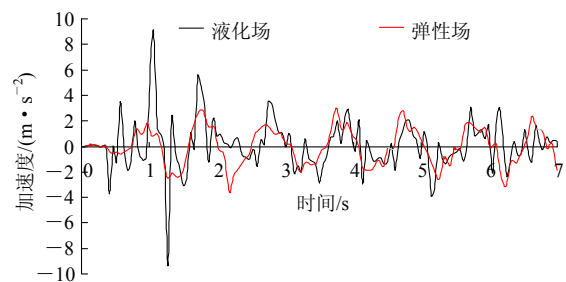


图 11 液化场与弹性场加速度反应对比历程图

Fig.11 Comparison of time-history of acceleration response in liquefaction field and elastic field

弹性场的稳态振动成分不衰减。弹性场加速度反应值是输入值的 3 倍。液化场加速度反应则有放大衰减过程，在 1.2 s 左右液化前，液化场加速度反应是输入加速度的 9 倍，可见液化场加速度放大十分明显，场地液化后加速度振幅衰减变小。

液化发生与输入加速度幅及频率有关。可液化场低频激励下加速度反应有 2 种情况：(1) 加速度得到放大但场地没有液化，由于阻尼存在，场地作稳态振动；(2) 加速度得到放大且场地发生液化，场地加速度反应过程为一个先放大后衰减的过程，放大程度受场地阻尼比影响，也受初始液化这一事件的限制。由结构动力学^[12]可知，共振动力放大倍数主要受场地阻尼比影响，阻尼比大动力放大倍数小，阻尼比小动力放大倍数则大，阻尼比大加速度达到最大值的时间长，阻尼比小加速度达到最大值的时间短。

3.6 实测液化场地震加速度记录佐证

目前国内外从现场得到的液化土层上的加速度记录十分有限，本文考察 2 个典型实例，反映液化对场地地震动加速度特性的影响：一个是美国 1987 年 Superstition Hills 地震，在 Wildlife 液化场地上地表加速度记录；第二个为日本 1995 年阪神大地震

Port Island 液化场地地表加速度记录。

将液化场地与附近的非液化同类场的地面加速度反应进行对比分析,是比较理想的反映液化对场地加速度特性影响的方法,但目前很少得到这种条件的实际场地加速度对比记录,由于无法得到以上2个液化场地附近的非液化场地的地震记录,孙锐和袁晓铭^[3]以距液化场震中50 km为范围设定非液化场,在这个非液化场地上任选7条水平加速度地震记录,以其最大平均值来代表非液化场加速度反应,考察2种场地地震反应的不同。统计数据显示,Superstition Hills地震Wildlife液化场加速度反应谱最大值(位于2.5 Hz)较非液化场地上加速度反应谱最大值(位于5 Hz)放大1.5倍,阪神大地震中Port Island液化场加速度反应谱最大值(位于1 Hz)较非液化场地上加速度反应谱最大值(位于4 Hz)放大1.1倍。液化场的卓越频率较非液化场低。弹性场加速度平均放大倍数不随输入幅值变化,放大倍数约为1.6。

4 结 论

通过本文一系列数值试验得出液化场这种特殊场地的加速度反应规律:

(1) 液化场加速度放大倍数随输入地震动的增大而减小。特别是地表土层在中、强震作用下具有显著的减震作用。

(2) 可液化场加速度反应的基本特征为低频放大、高频缩小,可液化场地的低频加振效应明显大于高频减振效应。用Finn模型做出的该试验结果与实际记录和现有的认识相符。但如文中所表明的如此显著的放大作用,还有待进一步的实际验证。

(3) 可液化场对低频加速度放大是可液化场固有的特性,场地加速度放大不一定产生液化,加速度达到一定程度场地才发生液化。若场地加速度放大后仍未液化,场地则维持稳态受迫振动。若场地加速度放大后发生液化,场地加速度则衰减。

(4) 液化过程中加速度反应的一个显著特点是液化的隔振效应,即场地产生初始液化加速度反应幅值开始衰减,场地完全液化加速度幅值衰减为0。

(5) 液化场低频共振时场地液化程度高,场地位移、变形大,孔隙水压力大,加速度反应大。

(6) 弹性场变形呈剪切型变形特点,加速度反应从下到上逐渐增大,地表面放大最显著。液化场变形为弹塑性变形,加速度放大在场地腰部最显著。

(7) 用地震波试验场地加速度反应频率特性不如正弦波试验结果明显,单一频率正弦波激振场地

共振效果比地震波试验更明显。输入接近场地卓越频率的正弦波,场地加速度反应大于输入地震波场地加速度反应。

(8) 高幅值输入易掩盖液化场频率特性,低幅值输入、低频激振液化场的频率特性显示较明显。

参考文献(References):

- [1] 黄雨,叶为民,唐益群,等.上海软土地震反应特征分析[J].地下空间与工程学报,2005,1(5):773-778.(HUANG Yu, YE Weimin, TANG Yiqun, et al. Characteristic analysis for seismic ground response of soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 773-778.(in Chinese))
- [2] 吕西林,任红梅,李培振,等.液化场地自由场体系的数值分析及振动台试验验证[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增2):4046-4053.(LU Xilin, REN Hongmei, LI Peizhen, et al. Numerical analysis of free field system in liquefiable site and validation of shaking table tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.2): 4046-4053.(in Chinese))
- [3] 孙锐,袁晓铭.场地液化对反应谱影响评价[J].应用基础与工程科学学报,2010,18(增1):173-180.(SUN Rui, YUAN Xiaoming. Evaluation of effect of site liquefaction on response spectrum[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(Supp.1): 173-180.(in Chinese))
- [4] MARTIN P P, SEED H B. One-dimensional dynamic ground response analyses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1982, 108(7): 935-952
- [5] 陈国兴.岩土地震工程学[M].北京:科学出版社,2007:296-324.(CHEN Guoxing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007: 296-324.(in Chinese))
- [6] MARTIN G R, FINN W D L, SEED H B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(5): 423-438.
- [7] SEED H B, SLIVER M L. Settlement of dry sands during earthquakes[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1972, 98(4): 381-397.
- [8] BYRNE P M. A cyclic shear-volume coupling and pore pressure model for sand[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Missouri, USA: [s.n.], 1991: 47-55.
- [9] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC^{3D}基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2009:296-324.(CHEN Yumin, XU Dingping. Foundation and project example of FLAC/FLAC^{3D}[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009: 296-324.(in Chinese))
- [10] 孙锐,袁晓铭,李雨润,等.循环荷载下液化对土层水平往返变形的影响[J].西北地震学报,2009,31(1):8-14.(SUN Rui, YUAN Xiaoming, LI Yurun, et al. Effect of liquefaction on cyclic deformation of soil layers under cyclic loads[J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31(1): 8-14.(in Chinese))
- [11] 何剑平,陈卫忠.自由场典型液化特征数值模拟试验[J].地震工程与工程振动,2011,31(2):162-169.(HE Jianping, CHEN Weizhong. Numerical simulation experiment of typical liquefaction characteristics for free field[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(2): 162-169.(in Chinese))
- [12] CLOUGH R W, PENZIEN J. 结构动力学[M].北京:高等教育出版社,2006:17-29.(CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 17-29.(in Chinese))