

循环荷载下液化对土层水平往返变形的影响

孙锐^{1,2}, 袁晓铭², 李雨润³, 曹振中², 陈龙伟²

(1. 哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;
3. 河北工业大学土木工程学院, 天津 300130)

摘要:采用多工况振动台实验研究液化对土层水平往返变形的影响。以干砂实验为参照, 分析孔压增长与土层加速度和土层往返变形之间的关系。结果表明: 液化将引起土表加速度显著降低, 减小惯性力传递, 但同时会引起土层往返剪应变明显增大。对往返变形而言, 液化土层往返剪应变就可达到1%~5%的大变形状态, 且液化土层往返剪应变沿深度呈下大上小分布。土层中孔压比0.4~0.8是往返变形出现放大的敏感段, 在孔压比0.8左右而不是在1.0达到最大。作为其结果, 土层液化将对刚性上部结构振动起减震作用, 但同时增大的往返剪应变也易导致基础和地下结构破坏, 特别是对液化层与下部非液化层交界处的构件更敏感。

关键词: 循环荷载; 液化; 加速度; 往返剪应变; 振动台实验

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2009)01-0008-07

Effect of Liquefaction on Cyclic Deformation of Soil Layers

SUN Rui^{1,2}, YUAN Xiao-ming², LI Yu-run³, CAO Zhen-zhong², CHEN Long-wei²

(1. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China;
3. College of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The effects of liquefaction on cyclic deformation of soil layers are investigated by shaking table tests. Taken the dry sand tests as a consult, the relations between the pore water pressure increasing and the accelerations and deformation of the soil layer are presented. The results show that the liquefaction greatly reduces the acceleration amplitude and inertia force of surface ground, meanwhile however, the cyclic deformations of the soil layer increase significantly. The cyclic shear strain in liquefied soil layers can reach 1%~5% and the strain in the upper layer is less than that in the sub layer. The sensitive range for obvious change of the cyclic deformation appears when the water pressure ratio is about in 0.4~0.8 and reaches the maximum when is about 0.8 rather than 1.0. As a result, the liquefied soil layer reduces the vibration of the rigid superstructure, but the increasing cyclic deformation due to liquefaction can easily destroy the foundation and underground structures, especially for the part of the foundation and underground structures near the interface between the liquefied layer and non-liquefied soil layer.

Key words: Cyclic loads; Liquefaction; Acceleration; Cyclic shear strain; Shaking table tests

0 前言

砂土液化是地震灾害最典型的现象之一, 是国际上工程抗震普遍关注的重要问题^[1-2]。国内外很

多大地震中都有砂土液化现象发生, 并造成了严重的破坏和经济损失。我国国土辽阔, 砂土分布广泛,

收稿日期: 2008-07-04

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2006B03); 国家自然科学基金(90710177, 50778165); 国家科技部社会公益研究专项(2005DIB2J122)

作者简介: 孙锐(1972-), 女(汉族), 黑龙江哈尔滨人, 研究员, 主要从事土动力学研究。

尤其是京津环渤海、长江三角洲和珠江三角洲三大城市群很多位于各河流三角洲、沿海平原、洪冲积平原、洪积平原等地域,饱和粉土、粉砂和细砂广泛分布;一些重大工程,如西电东送、南水北调工程等重大基础设施建设中也常穿越砂层。在中强地震作用下,砂土液化将引发液化震陷和地基承载力丧失,造成地基和土层附加沉降、结构和基础的倾覆、倾斜、开裂、滑动等,导致各类基础设施和建筑不能正常运行,功能部分甚至完全丧失,危害极大。因此,研究砂土液化及对工程结构的影响问题具有重要的理论意义和广泛的工程应用价值,一直是工程抗震中的前沿研究方向。

目前,关于液化可能性和初始液化判别研究已经有了较大进展,成果在抗震规范中已有所体现。但是液化对工程结构的危害性及分析方法方面尚不成熟,还存在很多问题。液化对工程结构的影响主要从惯性力和变形两个方面考虑。对于基础和地下工程结构等,土层变形比加速度的作用更为重要,此时土体变形的作用超过了惯性力的作用。液化土体变形是一个非常复杂的现象,一般可大致分为两种:一是土体永久变形,如竖向震陷和侧向扩展,这方面已经有一些研究成果^[3-4];二是土体振动型水平往返位移,为土体变形的一种基本形式,是水平场地常见的情况,与土层往返剪应变密切相关,对基础和地下工程的地震响应尤为重要。但目前这方面的研究尚少。液化变形方面可供参考的是动三轴或扭剪仪的土单元应力应变关系,不能反映实际土层的剪切运动;而以往液化土层振动台实验也主要关心的是液化对加速度反应的影响^[5],对于水平往返变形研究尚少。

本文采用多工况振动台实验,研究液化对土体水平往返变形的影响,分析孔压与土层加速度及位移间关系,力求对液化下土层往返变形有一些新认识。

1 实验设计和工况

1.1 实验设计的基本思想

为确定液化对土体动位移影响的基本模式,这里进行了等幅正弦波作用下的土层液化的振动台实验,因为等幅波作用非常简单,从反应现象中非常容易看到规律,一些现象也是不规则波反映不出来的。

另外进行液化实验的同时也进行了非液化的干砂土层实验,这样使液化土层地震动大小的衡量有一个明确的边界条件和参考。这也是本文实验的特

色之一,事实证明这一想法虽然简单但却非常有效。

1.2 实验装置

1.2.1 振动台及模型箱

实验采用中国地震局工程力学研究所研发的XFD-8型超低频信号发生器发出的电磁波驱动台面,发生器可以输出矩形波、三角波和正弦波等波形。振动输出频率为1~10 Hz;台面允许最大位移为8 mm;最大载重100 kg;水平向最大激振加速度为0.5 g。振动台的台面尺寸为0.9 m×0.7 m。

土层模型箱采用刚性容器,尺寸为510 mm×340 mm×320 mm。两个侧面装有有机玻璃,以便观察砂土在激振过程中的变化规律。

模型实验采用哈尔滨松花江砂,用砂筛去掉直径大于1 mm的颗粒。砂土级配曲线如图1所示。 $d_{10}=0.139$ mm, $d_{30}=0.198$ mm, $d_{60}=0.269$ mm;不均匀系数 $C_u=1.935$;曲率系数 $C_c=1.048$ 。

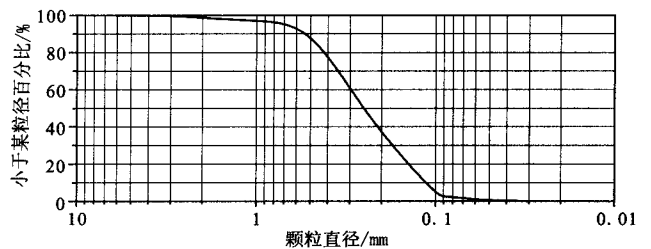


图1 模型实验砂土颗粒级配曲线

Fig. 1 Mechanical composition of the test sand.

1.2.2 传感器的布设

模型实验涉及的传感器主要是加速度传感器和孔压传感器,布设如图2所示。为了记录振动台台面的加速度,在台面上布置了一个加速度传感器,在土层的不同深度处布置了两个孔压传感器和三个加速度传感器。在试样制备时把加速度传感器预埋在土层的预定位置,并使加速度计主轴方向与振动台振动方向一致。

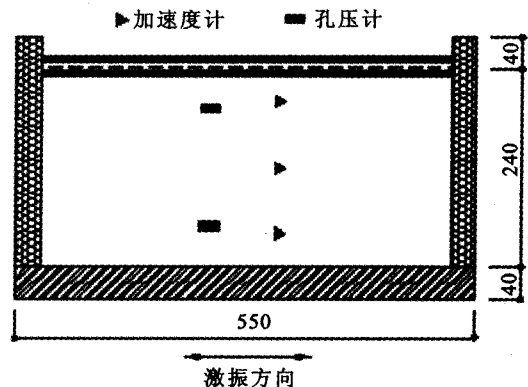


图2 传感器布设(单位:mm)

Fig. 2 Layout of the transducer.

数据采集系统分别为中国地震局工程力学研究所研制的 IK6B 数据采集系统及分析软件包。孔压传感器采用我国秦岭国家传感器厂生产的新型孔压传感器 (CYG14 型), 最大量程为 0.5 kg/cm^2 。以往实验室振动台液化实验中得到的孔压时程多不令人满意, 而良好的孔压记录是本文研究获得成功的关键之一, 因此本文在孔压传感器选型上下了一番功夫。从下面的结果看, 得到的孔压记录结果令人相当满意。

1.3 实验工况

实验工况如表 1, 均为等幅正弦波输入, 加速度峰值为台面实测值。

表 1 实验工况

实验编号	砂土相对密度 / %	输入频率 / Hz	实测加速度峰值 / $[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
T ₁ (干砂)	40	3	2.32
T ₂ (液化)	30	3	1.28
T ₃ (液化)	40	3	1.13
T ₄ (液化)	55	3	1.46

本文的特点之一是进行不同密度砂土的多工况实验, 以确定实验现象的普遍性。为了确保得到指定相对密度的饱和砂土, 预先称好砂土的重量, 根据

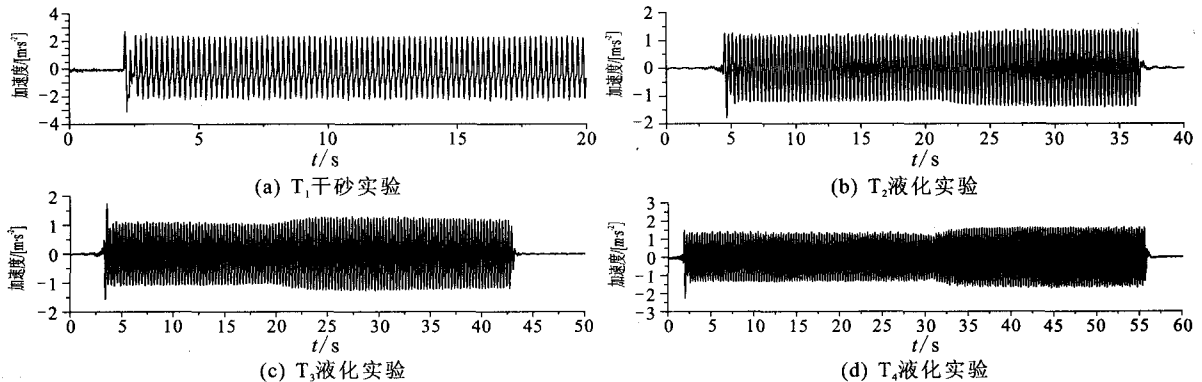


图 3 台面加速度时程

Fig. 3 Acceleration histories on the shaking table.

2.2 土体孔压时程

三次液化实验中记录到的土体中孔压比时程示于图 4。其中图中距离箱底 10 cm 和 20 cm 的标识代表土层不同深度, 分别对应土表面下部 16 cm 和 6 cm 处土体孔压响应。从图 4 可知, 不同深度处孔压的发展是不同的, 埋深较深的孔压比增长较埋深较浅的孔压比增长快, 这一点与近来其它振动台实验的结果类同^[6]。

T₂ 实验孔压比达到 1.0 需要 25 s 左右的时间, T₃ 实验孔压比达到 1.0 也需要 25 s 左右。虽然 T₂ 砂土的相对密度比 T₃ 的密度略大一些, 但 T₂ 输入

最大最小干密度来控制砂土的相对密度。采用水沉法制作饱和砂: 先在模型箱的里面注入一定量的蒸馏水, 经过砂筛均匀的往箱内撒砂, 为保证砂土自然落入箱内, 保持砂筛的撒落高度在 5~10 cm 左右; 控制水面高度在砂面以上 10 cm 左右; 然后在预先定好的位置上埋设相应的传感器。砂土成型工作结束以后, 上面留有一定量的水以使砂土充分饱和。饱和一段时间后在上面覆盖一层粉质粘土, 模拟上覆土层, 厚约 4~5 cm。然后在土层上面加配重进行固结, 时间为 24 小时左右。模型箱的前后两侧采用厚约 3~4 cm 海绵垫外包防水塑料布的方法, 防止海绵吸水同时减小边界效应带来的影响。

非液化土层模型成型过程相对比较简单, 用砂筛将干砂均匀地撒落到砂箱内即可。

2 实验结果

2.1 台面水平加速度

四次实验的台面水平加速度时程如图 3 所示。值得注意的是, 干砂实验的输入加速度较液化实验的输入加速度大, 约大 1 m/s^2 。

的加速度幅值也高于 T₃, 结果二者的液化发生时刻也基本相同。T₄ 实验孔压比达到 1.0 需要的时间为 40 s 左右, 尽管输入加速度幅值高于 T₂ 和 T₃ 实验, 但得到的累计孔压比变化较 T₂ 和 T₃ 实验要延迟, 其原因是饱和砂土的相对密度较前两次实验要高, 已经达到 55% 左右, 而 T₂ 实验砂土的相对密度为 30%, T₃ 实验砂土的相对密度为 40%。这一点说明相对密度对土层累积孔压的变化有很大影响。实验结果还表明, 虽然各次实验输入条件有所不同, 但孔压增长曲线的基本模式是相同的, 与目前现有的理论和认识相同。从实验结果看本文进行的土层

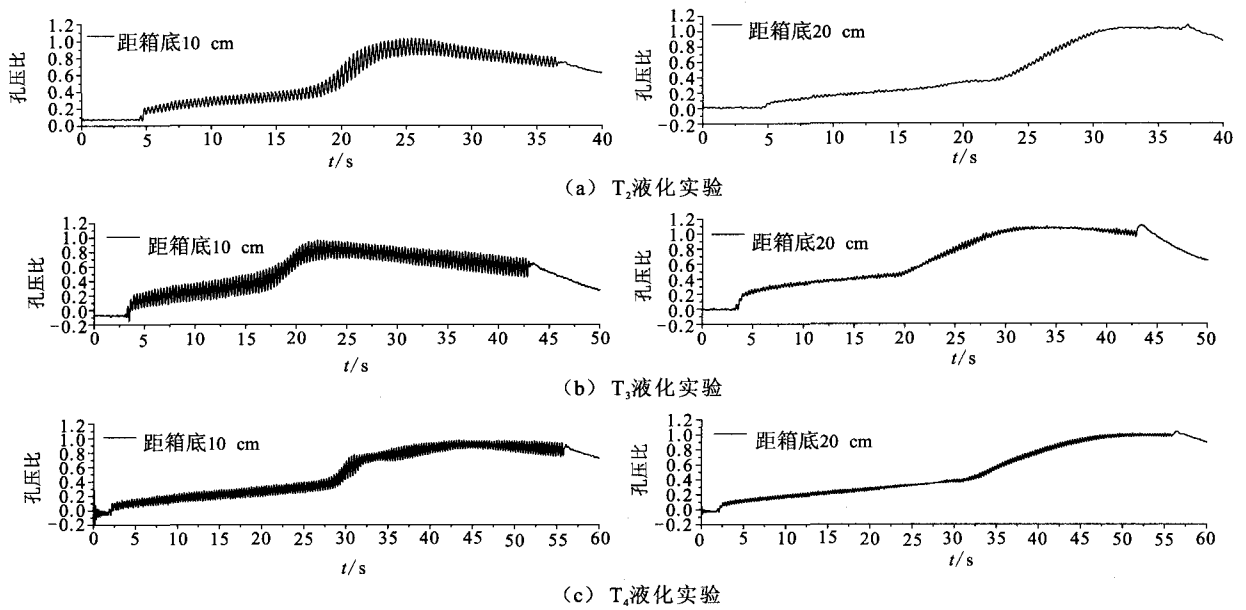


图 4 土层中孔压比时程

Fig. 4 Time histories of pore water pressure ratio in the tested soil layers.

振动台液化实验是成功的,孔压记录结果良好。

2.3 土层水平加速度

四次实验中所记录到的土体中(绝对)水平加速度时程示于图 5,表示距箱底 10 cm 和 20 cm(分别对应土表面下部 16 cm 和 6 cm)不同深度处的水平加速度响应。

由图 5 可见,干砂和孔压比小于 0.3 的液化土体,土层加速度的振动模式与输入相同,基本为等幅响应。但是不同深度幅值大小有变化,接近地表最大。其后,干砂实验中加速度一直保持等幅,而在三次液化实验中随孔压的进一步增长加速度幅值出现很大变化。距箱底 20 cm 处,即土表面下部 6 cm 接近地表处的加速度时程随孔压增长加速度幅值出现非常明显的减小,甚至几乎到零,且几次实验中幅值开始减小的时刻都与孔压开始增长时刻有良好的对应关系。由此可见,液化对地表附近的加速度起到显著的减小作用,这与以往的认识类同^[5-6]。从本文实验得到的更进一步的认识是,加速度减小的开始不是孔压比等于 1 的时候,而是 0.4 左右就有开始出现显著影响了。

2.4 土层水平往返变形

土层相对于台面的水平位移与土体水平剪切变形密切相关,比土体绝对位移更为重要,本文主要考虑此种位移响应。对于土层中位移目前尚无直接测试的成熟方法。按目前通常的做法,位移时程可以由加速度时程积分两次得到,这一方法对于本文输

入为往返正弦波的情况应没有问题。并且本文也曾将位移计置于土表,将土表位移实测结果与加速度时程积分方法进行了对比,结果符合良好,说明了本文使用的积分方法的可靠性。

干砂实验与三次液化实验的土层水平位移时程示于图 6,为方便对比,液化实验将孔压时程也同时给出。

如图 6 所示,干砂实验中位移小且幅值基本保持不变。对于可液化土,开始时跟干砂的反应类似,幅值小且变化不大,但是只要孔压出现上升,土体位移就有增长。当孔压比达到 0.4 左右时,液化土位移开始显著增长,在孔压比达到 0.6~0.8 左右时相对位移达到最大。 T_2 液化实验中,两种深度处最大位移分别为干砂的 5.6 倍和 9.7 倍; T_3 液化实验则分别为 7.8 倍和 11.1 倍; T_4 液化实验分别为 10.9 倍和 11.9 倍。也就是说,尽管干砂实验的输入加速度较液化实验大 80%,但液化土层表面最大位移约是干砂的 10 倍左右,且出现在孔压比 0.6~0.8 而不是 1.0 的时候。

利用不同深度的水平往返位移,可以近似得到土层的水平往返剪应变。在 T_2 液化实验中,土表面下部 16 cm 和 6 cm 两种深度处往返剪应变幅值分别达到 2.1% 和 1.8%; T_3 实验则分别达到 2.5% 和 2.1%; T_4 实验则分别达到 3.5% 和 2.2%。也就是说,液化土层往返剪应变幅值已经达到 1%~5% 的大变形状态,且出现在孔压比 0.6~0.8 而不是

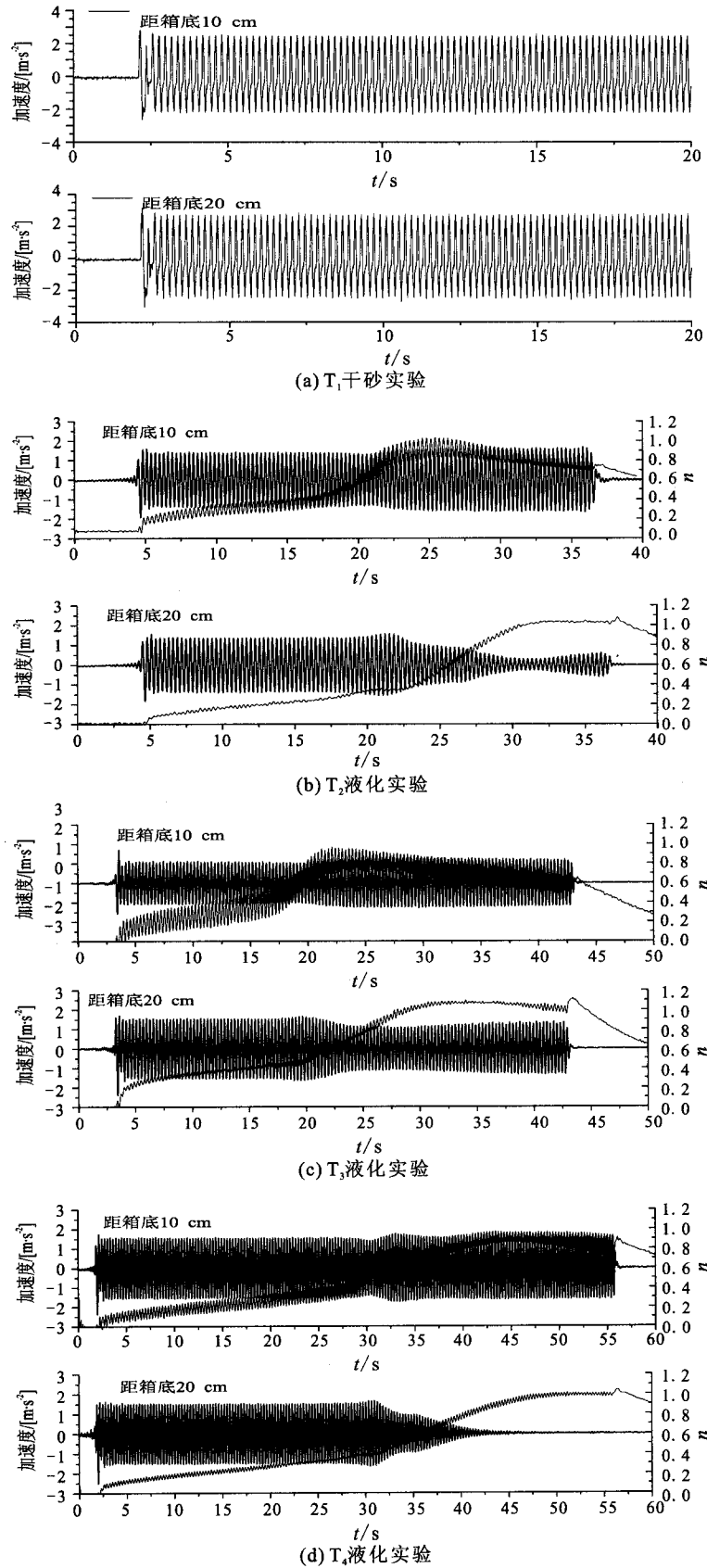


图5 土层加速度时程

Fig. 5 Acceleration histories of the tested soil layers.

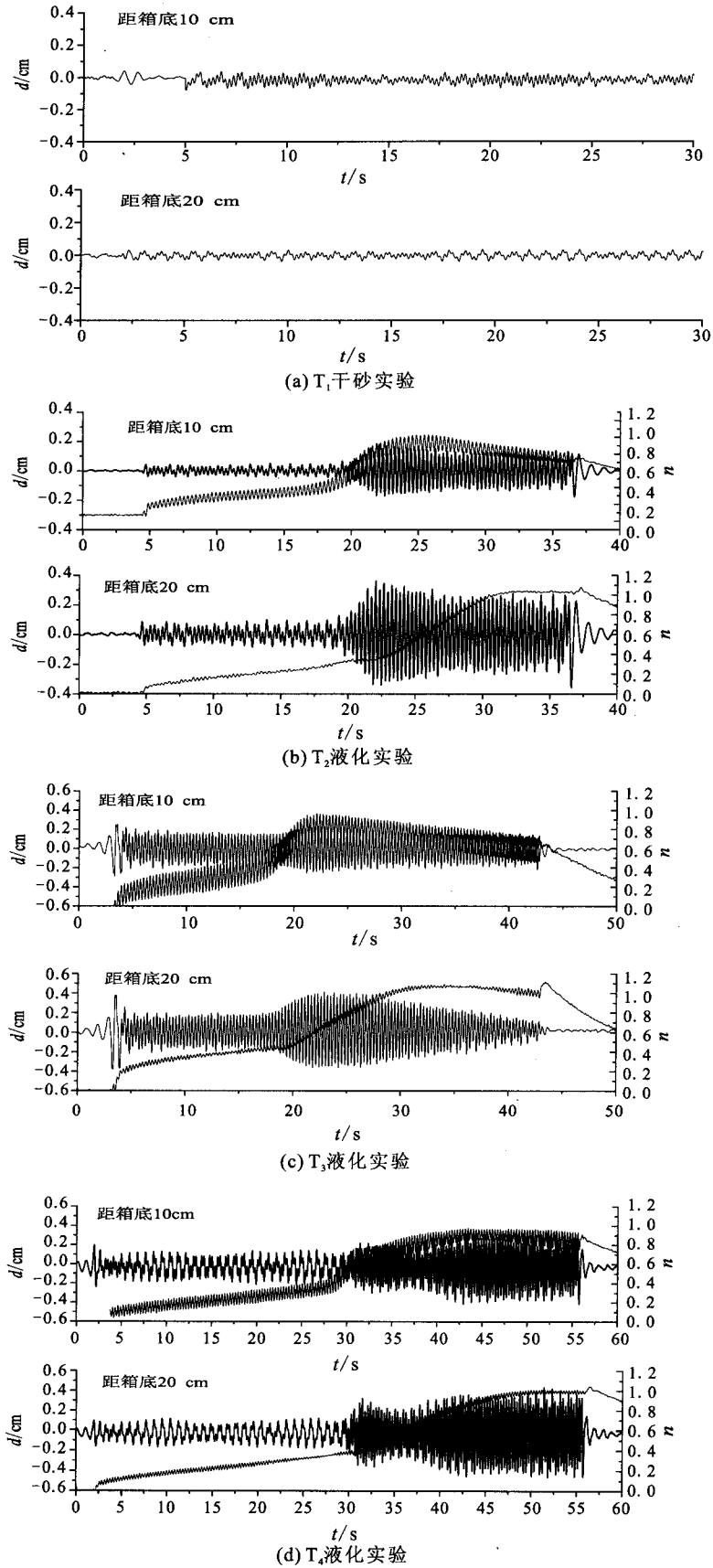


图 6 土层位移时程

Fig. 6 Displacement histories in the tested soil layers.

1.0 的时候。同时注意到,液化表层土体水平位移大于深层,但水平往返剪应变沿深度分布呈下大上小状态。

3 结论

就本文的情况,分析结果表明:

(1) 液化会引起土层水平加速度和土层水平往返变形的显著变化;

(2) 液化土层易减小水平惯性力,结果会对刚性较强的上部结构振动起减震作用;

(3) 液化土层虽然减小水平惯性力,但同时会引起土体水平往返位移和往返剪应变增大,就水平往返变形而言,液化土层往返剪应变幅值就可达到1%~5%的大变形状态;

(4) 液化土层往返剪应变沿深度分布呈下大上小状态,这样易导致液化层与下部非液化层交界处基础和地下结构的破坏;

(5) 孔压比达到0.4左右时,土层表面水平加

速度开始显著减小,土层变形幅值开始显著增大,当孔压比达到0.6~0.8达到最大。

本文进行的等幅循环荷载实验,真实地震输入下液化土层变形特征和规律有待进一步研究。

[参考文献]

- [1] 廖胜修,程菊红. 黄土场地震动液化实例[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 63-65.
- [2] 刘红玫,袁中夏,王峻. 基于内时理论的饱和黄土孔压增长模型的试验研究[J]. 西北地震学报, 2004, 26(4): 272-274.
- [3] 张建民. 地震液化后地基侧向变形对桩基础的影响[A]//第八届土力学及岩土工程学术会议论文集[C]. 北京: 万国学术出版社, 1999.
- [4] 刘汉龙. 地震液化区分布范围对地面大位移的影响[J]. 河海大学学报, 2001, 29(5): 1-6.
- [5] 李学宁,刘惠珊,周根寿. 液化层减震机理研究[J]. 地震工程与工程振动, 1992, 12(2): 84-91.
- [6] 苏栋,李相松. 砂土自由场地震响应的离心机试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(2): 166-170.