

相对密实度对随机波与定次数波作用下 土体变形关系的影响^①

孟凡超¹, 袁晓铭², 卢 滔¹

(1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:通过砂土的一系列动三轴实验, 研究不规则地震荷载作用下与定次数等幅荷载作用下土体变形间的关系, 给出砂土相对密实度对二者间关系的影响规律。结果表明: 真实地震荷载下土的变形发展与等幅正弦荷载明显不同, 应变发展时程的形态主要受地震动的形态控制; 应变比 C 与砂土相对密度间关系具有规律性, 随相对密度增大而降低, 若采用以 20 周作为标准作用次数、0.65 倍地震波峰值为等幅荷载代替不规则的地震荷载, 修正真实地震应力下的残余变形, 其应变比 C 随砂土密实度的增大而减小。同时, 冲击型荷载的应变比 C 要远大于振动型荷载。

关键词: 动三轴实验; 地震荷载; 等幅荷载; 相对密度

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0476-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0476

Effect of Relative Density on the Relationship between Soil Deformation under Irregular Waves and Fixed-number Waves

MENG Fan-chao¹, YUAN Xiao-ming², LU Tao¹

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

2. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: Conversion methods from seismic loads to uniform-amplitude loads are basic research topics in geotechnical earthquake engineering. Through a series of dynamic triaxial tests, the feature of soil deformation under irregular seismic wave loading and the relationships of soil deformation under irregular seismic wave loading and fixed-number wave loading are analyzed. The ratio of residual strain under a constant-amplitude sinusoid wave with 20 cycles and an amplitude of 0.65 times the seismic wave peak value to residual strain under seismic loading is defined as the strain ratio C , and the relationship between the strain ratio C and sand density is investigated. The results show that soil deformation development under irregular seismic loading obviously differs from that under sinusoidal loading, and the strain time history is mainly controlled by the performance of ground motion, rather than seismic loading amplitude and soil type. Under impact loading, the peak value (instead of other pulses) plays a significant role in control. Under a vibrating wave, besides the peak value, some other pulses with similar amplitudes and peak values have influences on the soil deformation. The strain ratio C will decrease with the increase of the relative density of the sand. When uniform sinusoidal loading, with 20 cycles and an amplitude of 0.65 times the seismic wave peak value, is employed instead of irregular seismic loading to modify

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2014320); 地震科技星火计划专项(XH13039Y); 中央高校基本科研业务费专项资金创新团队项目(ZY2012010)

作者简介: 孟凡超(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事土动力学与岩土地震工程研究. E-mail: mfciecm@163.com

residual deformation of soils under real seismic loading, the strain ratio C will decrease with the increase in the relative density of the sand. Meanwhile, the strain ratio C of impact-type loads is much larger than that of vibrating loads.

Key words: dynamic triaxial test; seismic load; loading with equal amplitudes; relative density

0 引言

岩土地震工程抗震研究的基本任务之一是确定土在地震荷载下的反应,地震动的特性和土的动力响应之间有十分密切的关系。随着生态抗震设计思想的出现和发展,地基基础和土工结构抗震设计的指导思想也从传统的强度分析为主逐步向以变形控制为主过渡,土体变形分析越来越受到重视。但由于地震荷载以及土非线性的复杂性,地震作用下土的变形理论目前很不成熟,还存在很多需要深入研究的问题,地震荷载向等幅荷载的转换方法就是其中的重要课题之一^[1]。

地震波是一种随机荷载,具有明显的不规则性和不对称性。由于问题的复杂性和仪器设备功能的限制,以往用于工程实际土的残余变形模型是基于等幅荷载实验得到的。为使等幅荷载结果应用于实际地震应力作用,Seed 和 Idriss^[2]提出了转化方法,即将实际地震应力峰值的 0.65 倍作为等幅循环应力幅值,等幅荷载的循环次数则依震级大小而定,称为有效应力循环次数,简称转换次数。对应震级 5.5~6、6.5、7、7.5 和 8,等价次数分别为 5、8、12、20 和 30。此方法在工程上一直被广泛应用,是目前有关土体地震反应分析方法、程序和地基基础抗震设计规范的基础。但是,随着工程实践的不断发展和研究工作的不断深入,Seed 转换方法暴露出不足^[3,8],主要体现在循环次数的确定上可操作性和可靠性很差,同时忽略了土体自身物理力学特性对转换结果的影响。强地震动作用下软弱土表现为一种强非线性反应,用一定次数等幅往返荷载代替不规则随机地震荷载的方式理论上肯定是不合适的。目前土体地震反应分析多是以烈度或加速度峰值为基本输入,由于地震烈度与震级之间并无对应关系,使转换次数的确定可操作性很差。

鉴于 Seed 简化方法循环次数确定上出现的问题,现有一种等效方法是直接取定次数 20 周作为转换后的等幅应力波的标准作用次数。目前一些研究方法和规范(如日本现行规范),都以此种等效方法为基础^[3,8]。Nagase 和 Ishihara^[8]进行了地震波和 20 周正弦波下的单剪液化试验研究,实验中输入的

地震波来自 1964 年新泻地震中 12 个加速度记录。结果表明,以土体产生应变 3% 为破坏标准,目前日本规范中的修正系数 C_2 按照砂土的不同密度取值范围在 1.4~1.8 间变化,即根据文中的实验结果,作者对饱和松砂、中砂和密砂建议平均修正系数 C_2 分别取 1.8、1.7 和 1.1。该方法基本满足工程上液化强度判别的要求。事实上,只要参数选取得适当,这种“等效”方法仍然不失为一种良好的途径。

但是,这一方法的基础是掌握地震荷载与定次数等幅荷载作用下土体变形间的关系,而目前对于二者关系的研究大多较零散,且多侧重于定性地揭示不规则动应力作用与往返动应力作用对土强度变形特性的影响^[4-5],而对土体自身物理特性对土体变形差异的影响研究尚少。以往相关研究已表明,砂土密实程度是影响砂土液化的重要因素,同时,不同密实度砂土对动荷载作用下的变形发展时程与残余变形影响较大,但这种影响有多大,如何定量衡量,目前关于此方面的研究还很少,而这正是其转换关系的关键和核心问题。这已经成为土体地震永久变形分析中亟待解决的问题。

本文通过砂土的一系列动三轴试验,研究不规则地震荷载作用下土体变形与定次数等幅荷载作用下土体变形间的关系,探讨砂土密实度对二者相互关系的影响及其规律,以期为土体变形中地震荷载向等幅荷载的转换方法奠定基础。

1 试验原理和设备

针对砂土密实度对随机波与定次数等幅正弦波作用下土体变形关系的影响问题,本文专门设计了一系列动三轴试验。试验是在中国地震局工程力学研究所和哈尔滨工业大学研制出的全自动地震波输入动三轴装置上进行的,如图 1 所示。该装置闭环控制精度高、频带宽,能很好实现力、位移控制下地震波实验功能,可保证施加荷载波形的良好复现。

2 试验方案

为了使结果具有可重复性和对比性,本次动三轴实验采用人工制备砂土样,其制备采用多层湿捣法。为消除不同砂土对实验结果的影响,实验用砂

采用福建标准砂和哈尔滨砂,其颗粒级配曲线如图 2 所示,物性指标见表 1。



图 1 地震波输入动三轴装置

Fig.1 Triaxial apparatus for seismic wave input

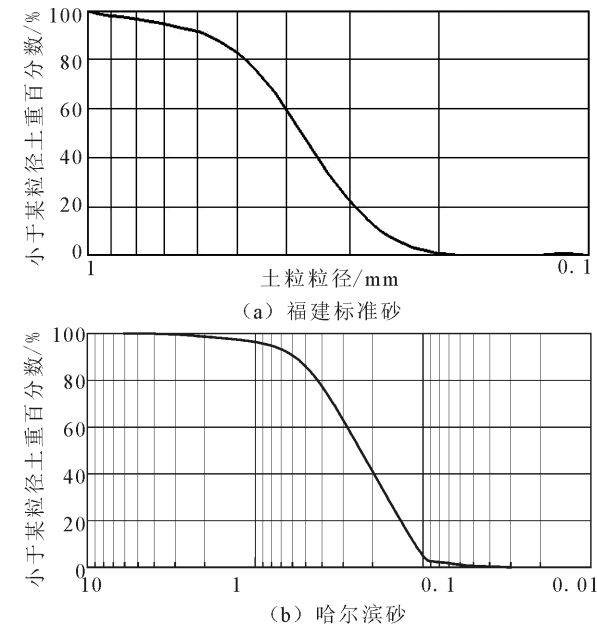


图 2 试验用砂颗粒级配曲线

Fig.2 Grading curves of the specimens used in the test

表 1 试验用砂的物性指标

Table 1 Index of the sands used in the test

土类	最大干密度 /(N·m ⁻³)	最小干密度 /(N·m ⁻³)	粒径/mm			不均匀 系数
			d ₁₀	d ₅₀	d ₆₀	
哈尔滨砂	16.9	14.8	0.26	0.35	0.4	1.54
福建标准砂	18.0	14.9	0.25	0.45	0.6	2.40

试样直径为 3.91 cm,高为 8 cm,含水率 $\omega = 12\%$,施加有效固结压力为 200 kPa,固结比 $k_c = 1.7$ 。加荷方式为:首先施加围压 σ_3 ,利用气压加载,动应力利用液压加载。动荷载类型采用正弦波和地震波,地震波分别采用冲击型波(迁安波、天津波)和振动型波(北岭波、Loma Prieta 波),其波形分别见图 3。对地震波动应力取三个幅值,分别为 320

kPa、240 kPa 和 160 kPa,正弦波的动应力幅值分别取其对应地震波峰值的 0.65 倍,频率为 1 Hz,循环次数为 20 次。为反映砂土密实程度的影响,需进行不同相对密度下的平行实验。采用相对密度 D_r 分别为 75%、50%和 30%的砂,以代表密实、中密和稍松三种状态。对每类土,有 3 个动应力幅值、5 个波形和 3 个密度的平行实验,总计 90 种独立工况,对每一个工矿制备一个土样,完成实验。

实验中,首先对试样施加 200 kPa 的有效围压,再施加 140 kPa 的竖向压力,在固结稳定后对土样施加 20 周循环等幅荷载或地震荷载。

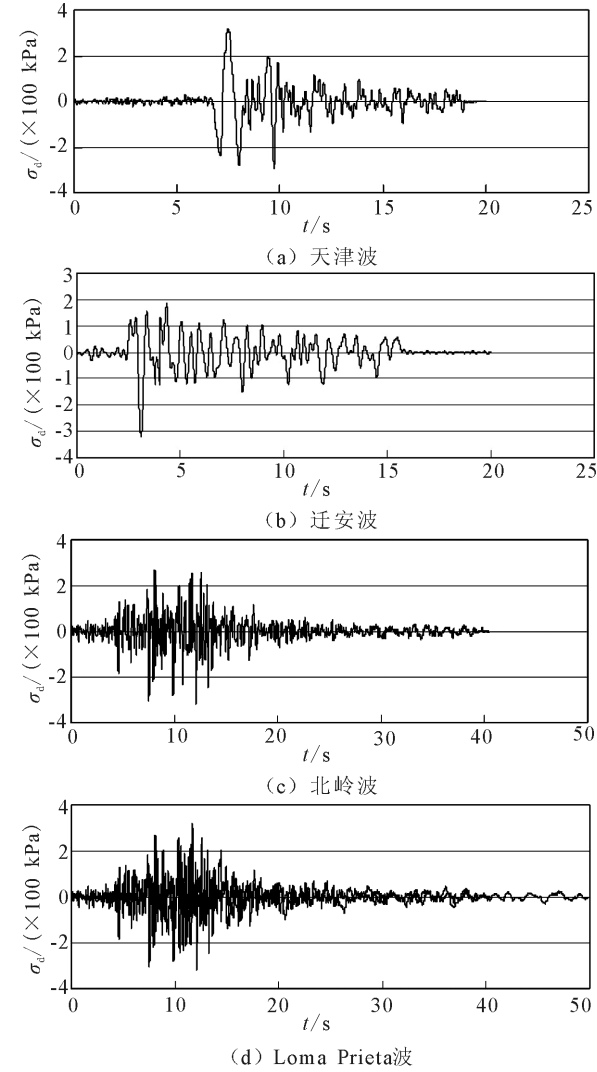


图 3 试验用地震加速度波

Fig.3 Earthquake acceleration waves used in the test

3 试验结果

图 4 给出了哈尔滨砂在迁安波(动应力峰值 $\sigma_{\max} = 320$ kPa)作用下和按 0.65 倍峰值折成的正弦波(20 周)作用下不同密实度的应变时程对比结果。

限于篇幅,哈尔滨砂和福建标准砂的其他实验结果略去。

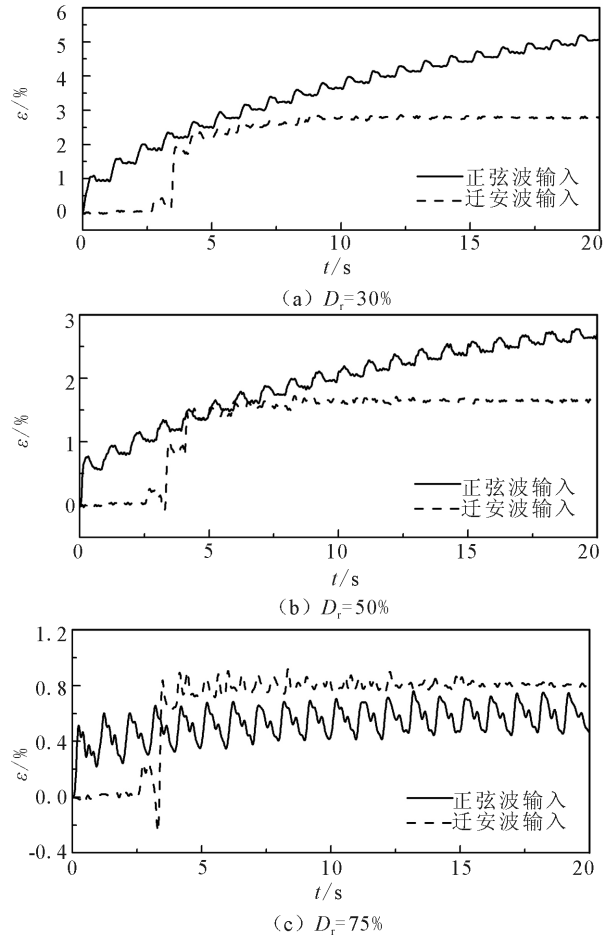


图 4 砂土试样不同密实度的应变时程比较(哈尔滨砂, $\sigma_{\max}=320\text{ kPa}$)

Fig.4 Comparison of strain time-histories of different density sand specimens (Harbin sand, $\sigma_{\max}=320\text{ kPa}$)

从图中可以看到,真实地震荷载下土的变形发展与等幅正弦荷载下明显不同。等幅正弦波作用下,前几个脉冲下砂土变形增长显著,随着循环次数的增加,应变增长越来越缓慢,逐渐趋于稳定;而在不规则地震应力波作用下,应变发展时程的形态主要受地震波的形态控制,与地震荷载的大小和土类型的关系不是十分显著。在迁安波、天津波这样的冲击型荷载作用下,峰值对反应起很大的控制作用,其他脉冲的作用很小。北岭波和 Loma Prieta 波这样的振动型波作用下,除峰值外,还有若干幅值大小与峰值可比拟的脉冲对土的变形发展有影响。但不论什么情况,不是所有的脉冲都对变形发展有贡献,特别是峰值后的脉冲,作用很小。

4 密实度对随机波与定次数波作用下土体变形的影响

本文以地震波作用下得到的残余应变为真实值,以 0.65 倍地震波峰值、定次数 20 周等幅正弦波作用得到的残余应变为实验标准值,实验标准值与真实值之比定义为应变比 C ,探讨 C 与砂土密实度的关系。

图 5 为哈尔滨砂和福建标准砂应变比 C 随砂土相对密实度的变化。由图可见,砂土的相对密度对 C 有较大影响,且它们的关系具有规律性。对两种砂土,松砂应变比 C 的变化范围在 1.88~0.28 之间,中密砂变化范围在 1.64~0.27 之间,密砂的变化范围在 1.09~0.17 之间,都随密度增大而降低。以天津波动应力 $\sigma_{\max}=240\text{ kPa}$ 作用下哈尔滨砂为例来说明这种规律性,对应于松砂、中密砂和密砂其 C 分别为 1.601、1.074 和 0.510,其他工况试验都显示出相同的规律。

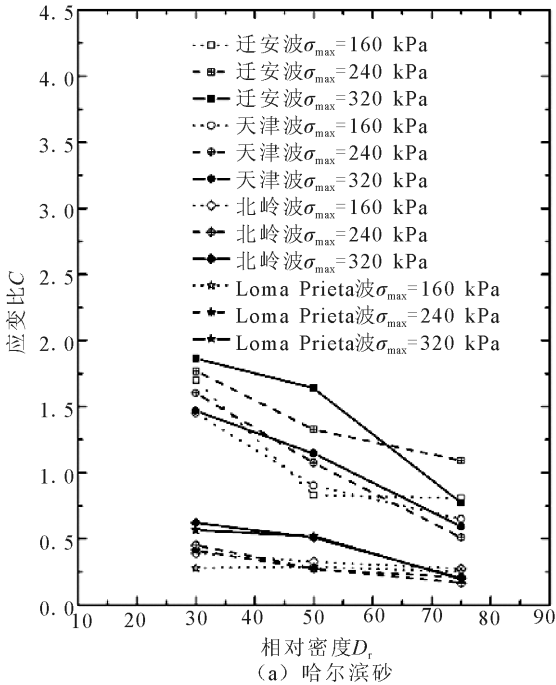
从图中还可以看到,应变比 C 分布在两个条形区域内,而这两个区域中间有一段距离,上面的条形区域是冲击型荷载作用下的结果,而下面的区域为振动型荷载作用下的结果,冲击型荷载的 C 要远大于振动型荷载的 C 。

以上分析表明,若以 0.65 折合最大幅值进行的正弦应力波实验代替真实地震波作用,以 20 周为标准,得到的土单元的应变比 C 随砂土密实度的增大而减小。

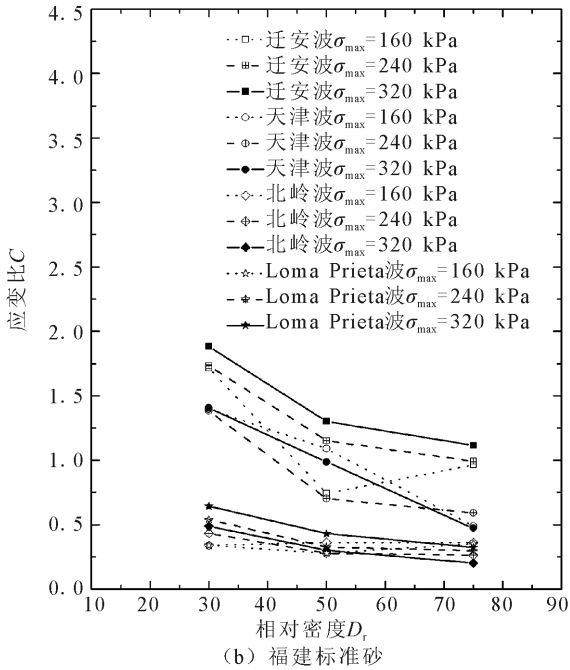
5 结论

本文以动三轴实验为手段,通过砂土的一系列实验,研究不规则地震荷载作用下与定次数等幅荷载作用下土体变形间的关系,探讨地震荷载的大小对二者间关系的影响规律。实验结果表明,真实地震荷载下土的变形发展与等幅正弦荷载明显不同,并不是所有脉冲都对变形发展有贡献,应变发展时程的形态主要受地震动的形态控制。若采用以 20 周作为标准作用次数的等幅荷载代替不规则的地震荷载,修正真实地震应力下的残余变形,从本文的结论看,砂土密实度对随机波与定次数波作用下土体变形间关系有较大影响,其应变比 C 随相对密实度的增大而减小。

地震荷载向等幅荷载的转换方法是工程应用急需解决的课题,本文虽然就砂土密实度对随机波与定次数波作用下砂土变形关系进行了研究,但还有



(a) 哈尔滨砂



(b) 福建标准砂

图 5 地震荷载与定次数等幅荷载作用下土体应变比随相对密度的变化

Fig.5 Variation of soil strain ratio with relative density under seismic load and load with constant amplitude and fixed number

很多因素会影响这种转换关系;其次,黏土和饱和砂土对荷载更加敏感,这些都需要做进一步的研究。

参考文献(References)

[1] 孟凡超.土体永久变形与地震荷载特征关系研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2009.
MENG Fan-chao.Study on the Relationship of Soil Permanent Deformation and the Characteristics of Seismic Loading[D].Harbin:Institute of engineering Mechanics, China Earthquake Administration,2009. (in Chinese)

[2] Seed H B,Iddris I M.Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential[J].Soil Mechanics and Foundations Division,ASCE, 1971,97 (SM9):1249-1273.

[3] Ishihara K,Yasuda S.Sand Liquefaction in Hollow Cylinder Torsion Under Irregular Excitation[J].Soil and Foundations, 1975,15(1):176-181.

[4] 全玉丁,杨贵,刘汉龙.原状饱和重塑海洋粉土动力特性对比试验研究[J].地震工程学报,2014,36(4):951-956.
TONG Yu-ding,YANG Gui,LIU Han-long.Comparative Test Study on Dynamic Characteristics of Undisturbed and Remolded Marine Silt [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014,36(4):951-956.(in Chinese)

[5] 袁晓铭,孙锐,孟上九.土地震大变形分析中 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.
YUAN Xiao-ming,SUN Rui,MENG Shang-jiu.Limitation of Seed's Method of Significant Cyclic Number in Analyzing Large Deformation of Soils During Earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2004,26(2):207-211. (in Chinese)

[6] 陈伟,张吾谕,马艳霞,等.压实黄土强度的三轴试验研究[J].地震工程学报,2014,36(2):238-242.
CHEN Wei,ZHANG Wu-yu,MA Yan-xia,et al.Triaxial Testing of Compacted Loess Strength[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(2):238-242.(in Chinese)

[7] 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.
MENG Fan-chao,YUAN Xiao-ming,SUN Rui,et al.Study on Effective Loads of Ground Motion for Permanent Deformation of Soils[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2009,29(5):170-178.(in Chinese)

[8] Nagase H,Ishihara K.Effects of load Irregularity on the Cyclic Behavior of Sand Dynamics and Earthquake Engineering[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1987,6(4):239-248.