

多遇地震下古建筑地基土体振陷特性实验

汤永净, 赵文深

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 古建筑因为历史建造和使用期长, 加上使用期间的地震作用, 多有倾斜, 其地基所受应力处于不均匀应力分布状态。通过动三轴试验, 针对两类软硬不同古建筑群地基土体, 选定不同固结比及动应力幅值模拟地基土在不均匀应力作用下承受多遇地震作用, 采集其变形累计并讨论土体各指标与应力水平间的变化规律, 发现软土的振陷主要发生在振动后的再固结过程中, 而硬土在类似小幅、多次振动下抗震性能较好, 且上部负重越大振动对其影响就越小。分析将为现有倾斜状态下的古建筑的结构稳定评估提供参考依据。

关键词: 古建筑地基土; 动三轴试验; 累计变形

中图分类号: TU435

文献标识码: A

Triaxial Test Research on Dynamic Settlement of Ancient Architecture Foundation Soil Under Frequent Earthquakes

TANG Yongjing, ZHAO Wenshen

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Owing to a long period of time in construction and using, coupled with the influence of earthquakes, most of the ancient buildings have a tilt and soils are in a state of non-uniform stress distribution. By selecting different consolidation ratios and dynamic stress amplitudes, the dynamic triaxial test analogs two kinds of foundation soils, soft and hard, under uneven stress in small and frequent earthquakes to discuss the regulations between the parameters of soil and changes in stress level, and also provide references on stability assessment of ancient buildings in existing tilt. The results show the dynamic settlement of soft soil mainly occurs in the reconsolidation process after the vibration, while the hard one performs well under this circumstance and tends to be safer when its upper weights become larger.

Key words: ancient architecture foundation soil; dynamic triaxial test; accumulated deformation

我国是历史悠久的文明古国, 拥有令世人瞩目的古建筑文化遗产。但由于古代建筑技术的限制以及几千年使用过程中的静力和动力作用下, 结构发生倾斜, 地基逐渐产生变形承受不均匀应力作用。这些累积变形及应力会对其后来的整体结构变形发展产生重要影响, 特别是对古建筑地基土在多次多遇地震作用下, 对不均匀应力条件下产生的附加变形, 导致其整体稳定性降低。

多次多遇地震作用下土体的变形累计主要是土体流变性质所致。土体流变研究, 目前主要集中在振动剪切强度与沉降变形两个方面。在影响地基土不均匀沉降方面, 土层不均匀、结构物荷载不均匀、地震荷载不对称三个主要因素中结构物荷载的不均匀是导致古建筑土体稳定性破坏的主要原因^[1]。此类振陷研究就显得尤为迫切和重要。

振陷是地震引起的土工构筑物或地基的残余变形, 也是导致其基础发生倾斜的主要原因, 大多数来自砂土液化和新近沉积淤泥质粘土软化。目前对于振陷的研究主要集中在土体残余应变与孔隙水压力的实验分析和计算模型的建立与预测^[2]。Seed 等^[3]早在 20 世纪 70 年代就开始了土体残余应变与孔压增长模型研究, 并得到广泛应用。1974 年, Lee^[4]曾对循环荷载三轴试样的残余应变作了比较系统的试验研究, 建立了一个预测作用若干次动应力后土试件产生的残余应变的经验公式。郁寿松、石兆吉等在国率先开展了软粘土和饱和砂土的残余应变和孔压试验研究以及模型建立, 在诸多实际工程中发挥了较好的参照作用^[4-6]。但针对承受复杂应力作用下已有倾斜的古建筑地基土体, 以及有间隔小幅振动对古建筑稳定性的影响的相关研究却略显匮乏。

目前我国对古塔等古建筑的保护大多集中于如何扶正以及在非倾斜状态下结构性能的分析上, 如西安大雁塔的抗震能力评价及杭州舒公塔的纠偏扶正等, 对于在多遇地震作用下塔体地基的安全性

稳定性的研究却明显不足. 本文土样取自上海及安庆两个古塔分部较集中且土性差别较大地区的持力层土体. 上海和安庆处于地震带边缘上, 小幅地震活动频繁, 对当地古建筑造成了损伤累积. 本文利用动三轴试验研究这两处多遇地震条件中不同应力水平下古塔地基土体的流变特性, 讨论土体在不同应力水平、与多遇地震作用等价的不同动应力比、多次地震作用条件下土体累计变形的规律, 为此类古塔的结构稳定评估提供参考依据.

1 试验介绍

1.1 试验仪器

试验在同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室进行, 采用英国 GDS (Geotechnical Digital Systems) 室内动三轴实验仪, 配有 GDSLAB 自动数控与采集系统, 仪器最大围压 2 MPa, 频率范围为 0~5 Hz, 试样直径高度分别为 39.1, 80.0 mm.

1.2 土样制备

试验所用上海地区淤泥质软粘土取自古塔下部约 20 m 深的上海④₁ 层土, 灰色, 软塑, 夹粉土或粉砂薄层(以下简称软土), 安庆地区沉积型老粘土取自安庆市中心下部约 4~7 m 深的老粘土层, 红褐色, 硬塑, 夹细石粒(以下简称硬土). 将现场钻孔挖掘所取土样经腊封后送至实验室进行土工试验, 采用标准方法, 将原状土放入切土器中切削为相应直径及高度的试样, 装入半开模称重、记录、装样、贴标签, 将切削下的余土装入试样盒称重、记录、烘干并测含水率及重度. 试样含水率分别为 51.7%~52.3% 和 23.6%~24.1%, 重度分别为 17.6~17.2 kN·m⁻³ 和 19.0~19.3 kN·m⁻³. 将制好的试样立即安装上机, 按试验参数设计好的试验程序进行调试后即可进行反压饱和, 待试样饱和度 B 值达到 0.85 后(由于实验方案不是针对土样破坏以及土质的因素, 土样不需要也很难达到完全饱和)进行排水固结, 分为等压固结约 12 h, 偏压固结约 12 h, 且每级偏应力增量为 20 kPa, 以避免在加压过程中发生强度破坏. 当孔隙水压力随时间趋于稳定时, 即可认为固结完成^[7].

1.3 试验方案

由于地震作用下所产生的沉降大体分为两部分: 一是动力荷载作用下土体中的不排水残余应变引起的瞬时变形; 二是地震后土体中超孔隙水压力消散所引起的再固结变形. 所以本试验采用有时间

间隔的 5 次小幅振动模拟古塔地基土体在长时间内承受的多次振陷瞬时影响, 利用 4 次间隔模拟试样再固结变形, 以观察土体继续流变情况. 结合其他小幅振动试验的经验以及实测地震频谱特性^[8-10], 本次试验中每次振动频率为 1 Hz(从实测地震频谱分析中得到基频为 1 Hz 左右), 时间 20 s. 在小幅地震下, 动应力中的拉压应力作用差异不明显, 因此用规则的正弦波模拟振动, 考虑到小振幅要求以及实际地区地震烈度(常遇烈度按 7 度), 取试验动应力幅值 σ_d 范围 5~35 kPa(动应力比范围 0.04~0.15, 一组对比试样取 0). 经过多次准备实验以及相关分析选定间隔时间 4~6 h, 分为排水 2~3 h 和不排水 2~3 h 分别进行稳定观察, 即认为再固结结束.

试样固结条件是根据现场土单元的实际应力状态和固结排水条件决定的, 考虑到古塔地基存在不均匀应力的作用以及上海和安庆地区土体应力状态的差别, 对软土样取试验固结应力比 K_{c1} 为 1.2, 1.4, 1.6, 对硬土样取 K_{c2} 为 1.2~2.5, 均取实验有效围压 σ_{3c} 为 100 kPa, 共做了 27 件动三轴试验, 见表 1.

表 1 动三轴试验方案

Tab. 1 Dynamic triaxial test plan

	K_c	动应力比						
		0.00	0.04	0.05	0.08	0.14	0.15	0.2
软土	1.2		* 1	* 2	* 1	* 1	* 1	* 1
	1.4	* 1		* 2	* 1			
	1.6			* 1	* 1			* 2
硬土	1.2							* 1
	1.25				* 1			* 2
	1.4							* 1
	1.6							* 1
	2.2				* 1			* 1
2.5							* 2	

注: “* 1”、“* 2”表示一组、两组

1.4 累积残余应变选定

残余应变是指动应力卸除后土体残留的应变值, 在动三轴试验中表现为动应力作用前后试样的高度差与动应力作用前试件的高度之比. 在本实验中选择 5 次振动中试样高度变化差值与第一次振动前试样的高度之比为累积残余应变, 作为反映古建筑地基土体在多遇振动后的位移表现.

2 数据整理与分析

2.1 软土

图 1 给出了软土土样在不同固结比下累积残余

应变与动应力比的关系,可以看出,残余应变随动应力比的增大而增大,相同动应力比下,固结比越大,残余应变越大,相近固结比之间残余应变差值约为

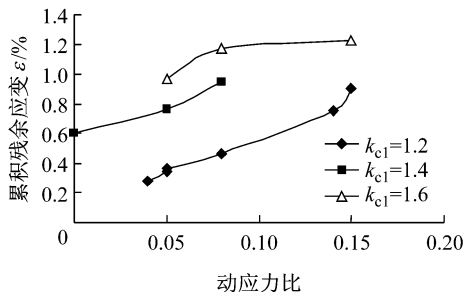
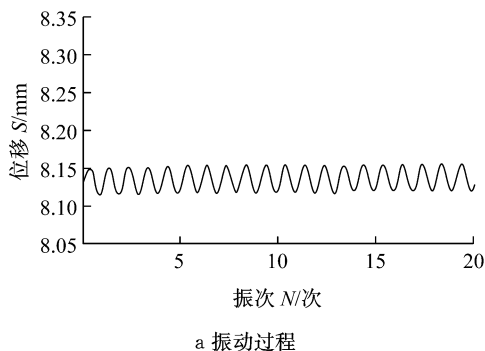


图 1 累积残余应变与动应力比关系图

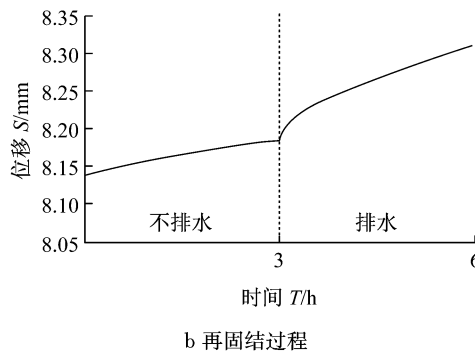
Fig.1 Relationship between residual strain and stress ratio

0.2%~0.6%, 按此比例换算到具体工况、具体建筑时此倾斜位移不可忽视。

图 2 为动应力比 0.05、固结比为 1.4 的某一试样在一次振动及之后再固结过程里的轴向位移变化情况,图 3 反映了期间孔隙水压力的变化(本试样设定仪器反压值=500 KPa),可以发现在 20 次的小幅振动下试样未发生显著变形,孔压也基本保持不变;在振动后不排水固结过程中试样变形缓慢增加,内部发生结构调整,而由于上海淤泥质软黏土具有低渗透性,孔压的发展具有明显的滞后性,导致孔压在此阶段上升,但幅度一般不超过 5 KPa;在振后排水固结过程中,由于先前超孔隙水压力转化为粒间有效应力,孔隙水被排出,加速土体的压缩变形,使此



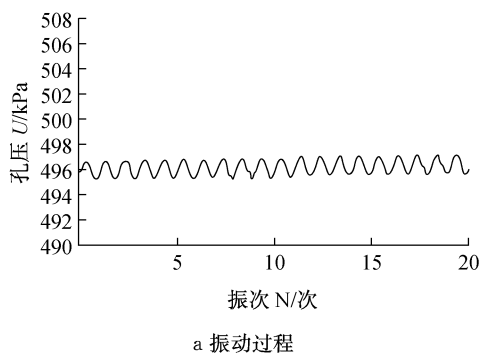
a 振动过程



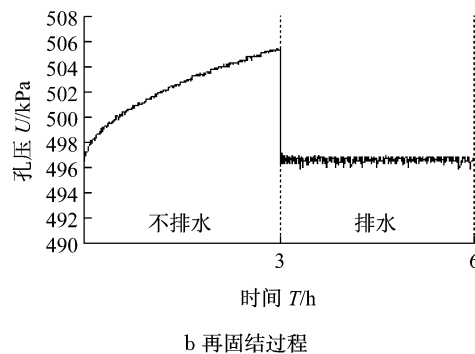
b 再固结过程

图 2 软土某试样振动一再固结位移变化曲线

Fig.2 Curve of displacement in vibration-reconsolidation of a soft soil sample



a 振动过程



b 再固结过程

图 3 软土某试样振动一再固结孔压变化曲线

Fig.3 Curve of pore pressure in vibration-reconsolidation of a soft soil sample

段变形速率略大,而孔压值回到压力室反压数值并保持稳定。

图 4 给出了振动、不排水、排水再固结 5 次循环过程中土样的累积应变值(图中 Z_n 、 G_n 、 K_n 分别对应第 n 次振动结束、第 n 次不排水再固结结束、第 n 次排水再固结结束试验阶段,下同),从图中可以看出,软粘土振陷呈现出塑性流动性状,且在低应力水平下土体塑性应变累积很小,但动应力比越大、固结

应力比越大,累积变形的趋势就越大,这主要是由于饱和软土的软化现象即变形模量的下降所致^[6],因此多次振动对土体稳定性的影响也就越明显,土体在结构未破坏前可发生的沉降值就越大,不同固结比下的应变差就越大,例如当动应力为 0.08 时固结比 1.6 的土样与 1.2 的土样最终的累积变形差达到了 0.6%之多。

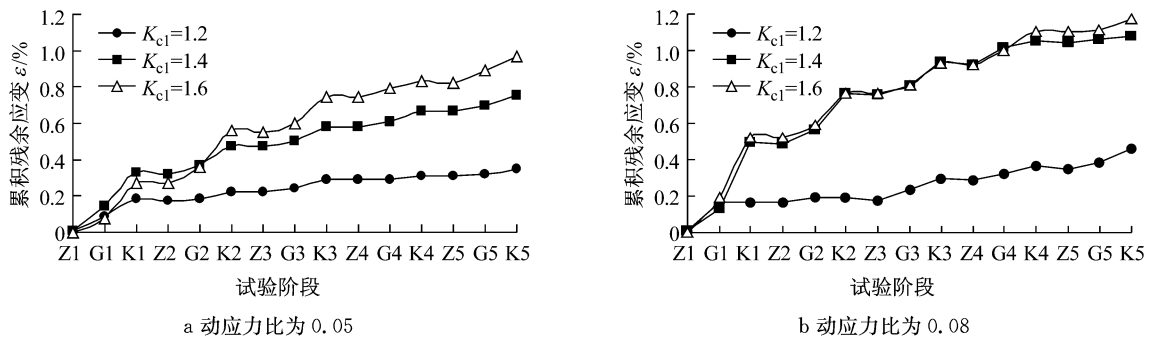


图 4 随试验阶段软土试样累积残余应变变化图

Fig. 4 Variation chart of accumulated residual strain with different test stages of soft soil samples

2.2 硬土

由于硬土土样具有类似黄土不连续、非均质的特殊结构性,振动中位移主要为土体颗粒垂直位移。如图 5 所取动应力比为 0.15 时的不同固结比图样在各阶段累积残余应变数据所示,在多次小幅振动后累积残余应变较小,所有试样均不超过 0.15%,且离散性较大;而且由于此类老粘土是一种超固结土,试验固结应力比越小可知其超固结比越大,在实验的固结阶段产生的变形也相应较小,振动过程土体中松散程度相对大,振动后累积残余应变也相应

偏高。这与软土的规律是相反的。当然图中也显示有部分数据略有偏差,这是原状土结构性扰动和实验过程中操作误差所不可避免的。图 6 显示动应力比为 0.2 的两组试样的残余应变较动应力比 0.15 及 0.08 下的试样的变形略有提高,约 0.2%。可以说,在小幅多次振动下,影响此类老粘土残余应变的因素并不是单一的,而是包括固结压力、动应力、循环次数以及土体本身的物理特征和结构性等诸多条件综合作用的结果^[11]。

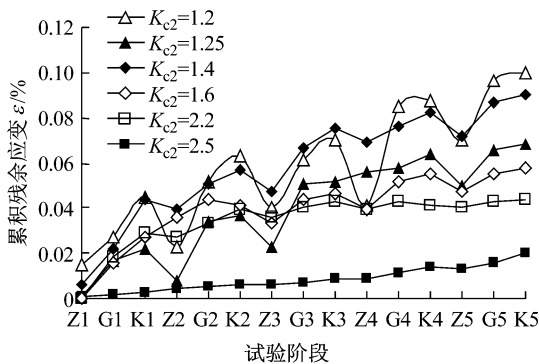


图 5 随试验阶段硬土试样累积残余应变图(动应力比 0.15)

Fig. 5 Variation chart of accumulated residual strain with different test stages of hard soil samples

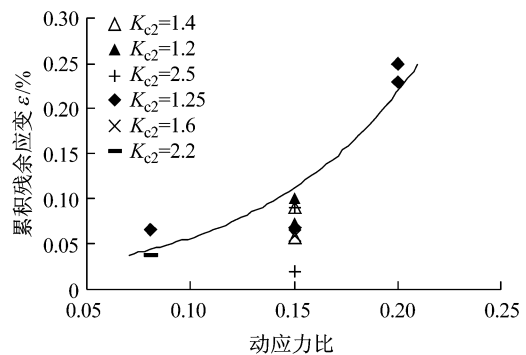


图 6 累积残余应变随动应力比变化点图

Fig. 6 Relationship point-graph between residual strain and stress ratios

图 7—8 为硬土某试样在一次振动及再固结过程中轴向位移变化以及孔压变化,由于此类硬土高密实度和强度的影响,试样只有在振动开始时才有极小的塑性变形压缩,再固结阶段时土体趋于稳定可视为无变化;孔压方面,由于老粘土渗透性差、应力较小,孔隙水压力一直极小波动保持稳定,其他试样实验结果也基本相似。图 8 试样设定仪器反压值为 100 KPa。

总体来讲,硬质老粘土的沉降变形及孔压变化在本实验方案下表现的离散性较大,规律不强,这与

土体自身、试验方案、仪器精度以及操作误差等都有一定联系,数据量级偏小是一个主要因素。

3 结论及建议

(1)上海地区软黏土振陷变形随振动幅值、固结比的增大而增大。在多次小幅振动过程中,瞬时振陷并不明显、数值较低,在振后再固结中振陷变形显著增大,因此对地震发生后的古建筑地基进行及时的加固措施尤为重要。

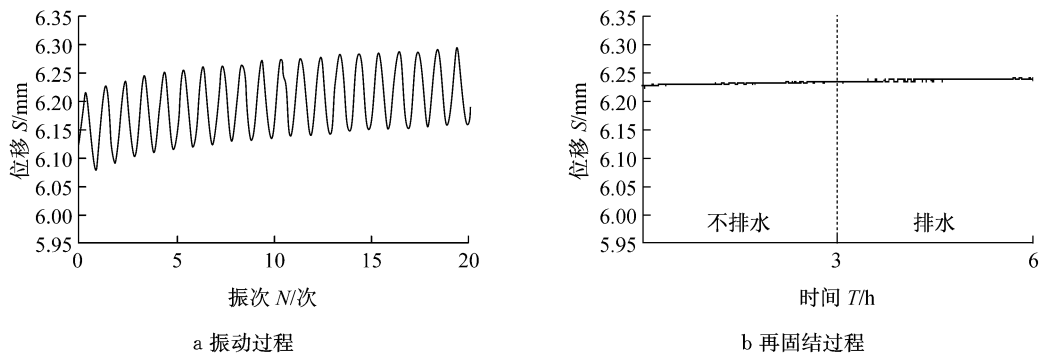


图7 硬土某试样振动—再固结位移变化曲线

Fig.7 Curve of displacement in vibration-reconsolidation of a hard soil sample

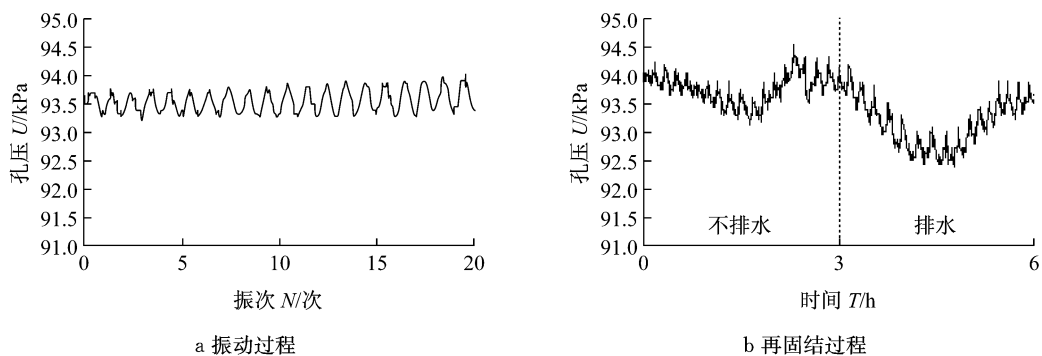


图8 硬土某试样振动—再固结孔压变化曲线

Fig.8 Curve of pore pressure in vibration-reconsolidation of a hard soil sample

(2) 安庆地区老粘土由于特殊的结构性,在本实验所模拟的条件下,残余应变以及孔压值总体上受到的影响不明显,数值变化很小。

残余应变随动应力比增大而小幅增大,在此类硬土的相关研究中也表明,在其所受动应力达到使其结构破坏的临界动应力之前,动应力所引起的残余应变处在很小的量级,且规律性较差。本实验基本在 0.15% 以内,属于土体正常变形反映。

(3) 安庆地区古建筑地基土体在本实验中抗震性能表现很好,固结比即轴向偏应力越大,振动后变形越小,即地基土上部负重越大,在经历多遇地震后古建筑更偏安全,与软粘土地基情况相反。控制其振陷发展的根本还在于保持结构性完整即提高硬土结构性破坏时的临界动应力。

(4) 针对古建筑土体小幅、多次振动的实验研究,由于仪器灵敏度、精度限制、操作误差以及原状土扰动等诸多因素影响,实验所得数据离散性较大,规律性不强,加之目前对粘土振陷相关微观机理的认识尚有不足,此类研究有待深入。

致谢: 本实验在同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室进行,吴晓峰老师、卢燕怡老师、周健

老师以及邵振东高工给予本试验诸多指导和帮助,对他们谨致谢意。

参考文献:

- [1] 袁晓明,孙锐,孟上九,软弱地基土上建筑物不均匀震陷机理研究[J]. 土木工程学报,2004,37(2):67.
YUAN Xiaoming, SUN Rui, MENG Shangjiu. Research on mechanism for earthquake-Induced differential settlement of buildings on soft subsoil[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(2):67.
- [2] 谢定义. 土动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1989.
XIE Dingyi. Soil dynamics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1989.
- [3] Seed H B, Martin G R, Lysmer J. Pore-water pressure changes during soil liquefaction [J]. Journey of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, 102 (GT4): 327.
- [4] 石兆吉,郁寿松. 土壤震陷试验研究[J]. 岩土工程学报,1989, 4(11):35.
SHI Zhaoji, YU Shousong. Experimental investigation of soil settlement due to earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989,4(11):35.
- [5] 孟上九,曹文海,袁晓明. 地震荷载下土体残余应变及孔压研究综述[J]. 世界地震工程,2001,17(3):49.

(下转第 1503 页)