

文章编号: 1000-7598-(2004) 02-0194-05

饱和软粘土在冲击荷载下的动力特性研究

孟庆山¹, 汪 稔¹, 雷学文², 胡建华¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 通过对淤泥质饱和软粘土施加冲击荷载进行室内动力固结试验, 研究了软粘土在冲击荷载作用下的应力、孔隙水压力、轴向变形等动态响应特征, 并通过三轴剪切试验结果, 分析冲击荷载对淤泥质饱和软粘土的加固效应。试验结论对于动力固结理论的完善和现场施工具有指导意义。

关 键 词: 饱和软粘土; 冲击荷载; 动力固结; 三轴试验

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Dynamic properties of saturated soft clay under impact loading

MENG Qing-shan¹, WANG Ren¹, LEI Xue-wen², HU Jian-hua¹

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: For the saturated silty soft clay, dynamic consolidation experiments, which reveal the dynamic stress, the dynamic properties of pore water pressure, axial strain of soft clay under impact loading, have been carried out. Additionally, the compacted effects of soft clay under impact loading have been also analyzed by the result of triaxial compression tests. The conclusions of experiments are propitious to perfecting the theory of dynamic consolidation.

Key words: saturated soft clay; impact loading; dynamic consolidation; triaxial compression tests

1 前 言

我国幅员辽阔, 自然地理环境差异明显, 存在着种类不同、性质各异的地基类型。随着沿海经济带的迅猛发展, 越来越多的工程构筑物不得不建立在地基条件很差的岩土体上, 软土地基是我国沿海地区工程建设中普遍存在的地基类型。通常, 软土是指第四纪时期形成的海相、泻湖相、三角洲相及湖沼相的粘性土沉积物或河流冲积物, 有的属于新近淤积物, 其基本特性是: 天然含水率高、孔隙比大、压缩性大、渗透性差; 在上部荷载作用下, 软土地基的承载能力低, 沉降变形大, 不均匀沉降明显, 沉降固结历时较长; 软土具有一定的结构性, 尤其是滨海相软土, 一旦受到扰动, 其絮状结构受到破坏, 地基强度明显降低, 乃至呈现流动状态^[1]。

多年来, 软土地基固结沉降、变形及强度问题

一直是国内外众多岩土工程界学者及建设者们普遍关注的问题之一。因此, 对于软土地基采取何种有效方法进行加固方面的研究与工程实践都比较多, 由此带动了动力排水固结理论的发展并在工程实践中得以广泛地应用。白冰^[2, 3], 曾庆军^[4]等主要进行了冲击荷载下软粘土的室内固结试验, 总结了冲击荷载作用下重塑饱和软粘土的孔压增减及土体变形规律, 但对于冲击荷载施加瞬间土体的动态响应特征研究的还不够深入。李彰明^[5], 丘建金^[6], 徐金明^[7]等主要以现场试验研究为主, 通过现场测试对动力排水固结法施工工艺加以研究。由于现场试验条件的局限性, 在试验过程中的监测往往不够系统, 因而, 对于动力排水固结法加固饱和软粘土的固结机理的认识还不够充分与完善。笔者通过自行改造的动力固结装置对原状土样进行室内动力固结试验, 采集了冲击瞬态应力、孔压的变化, 综合轴向应变分析冲击荷载作用下土体的动态响应

收稿日期: 2002-11-29

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. 2002CB412704), 中国科学院武汉岩土力学研究所博士科研启动基金资助项目(No. Q220302)。

作者简介: 孟庆山, 男, 1974 年生, 博士, 主要从事岩土力学和软基加固处理研究。

特征,类似的研究是不多见的。本文的研究对于动力固结理论的深入认识具有重要意义,有利于完善动力固结法(强夯法)的现场施工工艺。

2 试验设备与试样

综合前人所作研究,本次试验对 SJ-1A 型应变控制式三轴剪力仪进行改装,以实现淤泥质饱和软粘土试样(原状样)施加冲击荷载的功能,并利用工程动测仪数据处理系统,完成冲击瞬间的冲击应力、孔隙水压力信号的采集与分析。

为使室内试验更加符合地基土的实际受力特点,利用高压氮气压缩不可压缩的液体(蒸馏水),向三轴剪力仪压力室施加周围压力,既允许试样产生侧向变形,又能兼顾考虑不同围压下土体动态响应的区别。施加动力荷载的冲击装置是考虑到现场强夯的实际情况自行设计的。设计适当质量的底盘用以平衡传力杆与O形密封圈之间的摩擦力,底盘与落锤导杆连接处垫一适当厚度的橡胶垫,以避免落锤与底盘间的刚性接触。落锤导杆与三轴剪力仪传力杆之间放置应力传感器,以量测落锤对试样施加的瞬态冲击应力大小。孔隙水压力的测点位于试样底部,两种传感器均为电阻应变式,分别与 YE3817T 型动态电阻应变仪连接,然后通过 RSM-24FD 工程浮点动测仪数据处理系统,完成对冲击瞬间动应力、动孔压信号的采集与分析。百分表对称安装在底盘的两侧量测轴向变形,试验装置如图1所示。

传感器标定:文献[8]通过对加速度传感器、孔隙水压力传感器以及侧压力传感器的动标与静标相比较发现,动标得到的传感器灵敏度与静标得到的灵敏度相差不超过 $\pm 5.8\%$ 和 $\pm 3\%$ 。因而,本次试验采用静力标定方法。

土样取自广西沿海地区,第四系地层分布较广,主要是粘土、粉质粘土和淤泥质粘土、粉砂、中-细砂、淤泥质砂、淤泥和泥炭等各类土层,结构

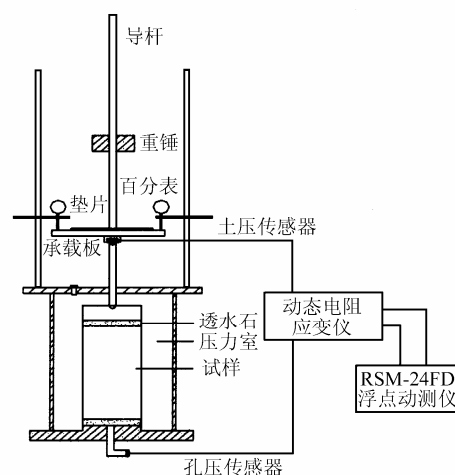


图1 试验装置简图

Fig.1 The equipment of experiment

松软,固结程度低,土体强度低,变形大,压缩性高,承载力低,地基稳定性差。沿海某港口拟建大型仓库,地基为典型的软粘土地基,处理场地为海滩-海滨区的一个大水塘,塘底为多年沉积的淤泥及淤泥质土,厚度变化较大,最厚处达14 m左右,后经填土平整而形成现有场地,填土厚度为1.7~4.5 m不等。场地内存在两种不同类型的地下水:一类是赋存于填土及淤泥层中的上层滞水,主要由大气降水及海水补给,水量一般;另一类是赋存于强风化泥质砂岩夹页岩中的孔隙潜水,其富水性较差,水量不丰富。

试样尺寸为:直径 $\phi = 6.18$ cm,高度 $h \approx 12$ cm,采用抽气饱和法使试样的饱和度 S_r 达到93%以上。各组试验都是在试样周围贴滤纸条,滤纸条与上下透水石相连,以加快孔隙水压力的消散速度。为了更好的模拟动力排水固结法处理软土地基,根据实际强夯工程中塑料排水板的尺寸及间距,考虑到每一夯点的加固范围,以直径6 mm的麻花钻在试样的轴向中心缓慢进行钻孔,贯通试样的上下表面,钻孔用细砂填实,以砂井模拟塑料排水板的排水作用,淤泥质饱和软粘土的物理力学指标见表1。

表1 淤泥质软粘土物理力学性质
Table 1 Physical and mechanical properties of silty soft clay

土工参数 统计量	含水率 /%	重度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比	液限 /%	液性 指数	塑限 /%	塑性 指数	粘聚力 /MPa	摩擦角 正切值	压缩系数 / MPa^{-1}	压缩模量 /MPa
均值 μ	46.57	17.05	1.275	50.51	0.908	23.8	24.36	14.63	0.124	1.157	2.15
标准差 σ	6.93	0.716	0.198	7.928	0.152	2.89	4.39	4.512	0.023	0.322	0.44
$\alpha = 0.05$ 置信区间	43.8~49.4	16.8~17.3	1.2~1.35	47.6~53.6	0.85~0.97	18.8~28.8	22.7~26.2		0.11~0.138		1.39~2.91

3 试样动力固结

本文研究的重点在于,使原状土样在三轴仪压力室内一定围压下完成主固结,利用不同冲击能量分遍对试样进行动力固结,通过冲击动应力、动孔隙水压力、残余孔压、轴向应变等测试量的比较,结合三轴 CU 剪切试验结果进行对比分析。具体试验方案见表 2。

表 2 试验方案简表
Table 2 The schemes of experiment

试样 编号	周围 压力 /kPa	冲击 遍数 /遍	每遍 冲击 次数	冲击能量/N·cm			备 注
				第一遍	第二遍	第三遍	
a-1	50	3	8	5×20	5×28	5×36	常规三轴剪切
a-2	100	3	8	5×20	5×28	5×36	常规三轴剪切
a-3	150	3	8	5×20	5×28	5×36	常规三轴剪切
a-4	50						常规三轴剪切

注: a-1, a-2, a-3 试样中心处有一贯通上下直径为 0.6 cm 的砂芯排水井,所有试样周围贴滤纸条。

原状土样在给定的围压下进行等压固结,其固结度达到 93% 以上,施加第一遍冲击荷载,待上升的孔压消散 90% 以后,再进行下一遍冲击。三遍冲击完成后,待孔隙水压力完全消散,进行三轴 CU 剪切试验,剪切速率为 0.073 mm/min,按照应变控制标准,轴向应变达到 20%,即停止剪切。

4 试验资料整理与分析

动力排水固结法主要包括排水系统和加压系统。排水系统包括水平排水体和竖向排水体;加压系统包括静荷载和动荷载。图 2, 3 分别为 RSM-24FD 浮点动测仪采集到的冲击瞬间动应力、动孔隙水压力的波形图,从冲击应力波形可以看出,第二应力峰值与第一应力峰值相比较小,这与在实际强夯过程中采集到的应力波形比较相似,因此,用重锤冲击试样可以模拟强夯中的动荷载,而且,底盘的重量不仅可以抵消传力杆与 O 形密封圈之间的摩擦力,还能在试样上施加一定的垂直压力,起到静荷载的作用;试样中的砂芯排水井和试样周围的滤纸条以及试样两端部的透水石则可以起到排水的作用。由此可见,用本文设计的冲击装置模拟动力排水固结加固饱和软粘土是可行的。

冲击应力激发的过程(只考虑第一应力波)约为 46~50 ms,而试样底部测试的冲击瞬间孔压也同样对应出现了一个峰值,该激发过程维持约 82~90 ms。可见冲击应力作用时间远小于所激发的孔

压峰值持续的时间。由于在孔压测试位置处安装土压力传感器存在困难,因此,未能采集到试样同一位置土体应力和孔压的波形图,但是,在广西某动力排水固结法处理软基的工程中,通过现场实测的波形反映出土体同一位置处孔压峰值到达的时间比土压力峰值到达的时间有所滞后。

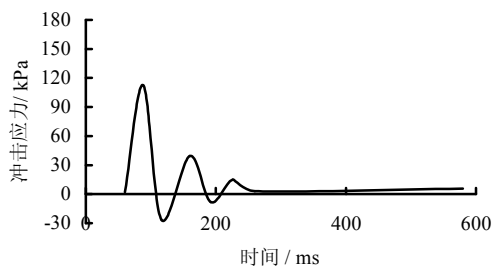


图 2 冲击应力波形图

Fig. 2 The curve of impact loading

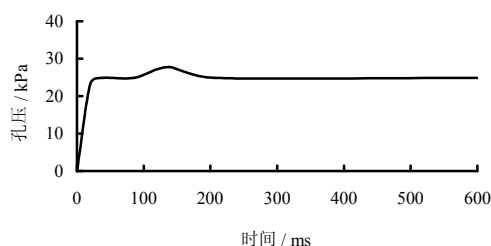


图 3 冲击荷载波形图

Fig. 3 The curve of pore water pressure

图 4 表明,同一围压(σ_3)下,冲击应力随冲击能量的增大而增大,相同的冲击能量、高围压下土样所承受的冲击应力较大。由于砂芯排水井上下贯通,土体内孔隙水压力较无芯试样内的孔隙水压力分布的均匀性好,高围压下,粘性土表现出来的弹性就占有一定的优势,而塑性较弱一些,土体变形模量较大,所以,土体轴向变形小,而能承受的冲击应力则相应增大。

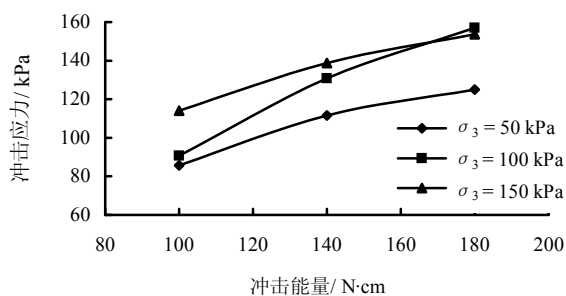


图 4 冲击应力随冲击能量变化曲线

Fig. 4 The relation curve between dynamic stress and impact energy

图 5, 6 给出在围压为 50 kPa 下, 土样 a-1 完成主固结后, 施加三遍冲击荷载的过程中采集到的瞬态孔压、残余孔压随冲击击数的变化曲线。由图可见, 随着冲击遍数的增加, 虽然冲击能量在不断地加大, 但孔压的增幅却有所减少, 根据有效应力原理, 每遍冲击后, 试样允许排水固结, 孔隙水压力得以快速消散, 通过遍与遍之间比较, 外部施加的总能量有所增加, 而试样内的孔压在不断地减少, 可见, 每遍冲击后试样的有效应力总比冲击前有较大幅度的增长。从孔压的增长趋势看: 孔压的增幅随击数的增加而不断减小, 当击数达到 6~8 击时, 其增幅与前几击增幅相比已相当小, 所以, 击数控制在 8 击是较为合理的, 这与实际强夯施工工艺也是相吻合的。通过连续冲击 20 击的试验结果可以看出, 孔压在 8 击以后增幅明显减小, 当击数超过 12 击以后, 孔压逐渐趋于一稳定值, 孔压随击数呈双曲线形式发展^[9]。

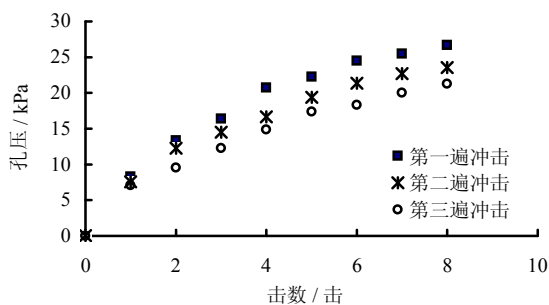


图 5 冲击瞬间孔压随击数变化曲线

Fig. 5 Relationship between pore water pressure and impact number

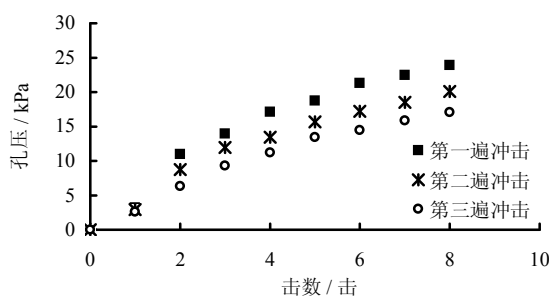


图 6 残余孔压随击数变化曲线

Fig. 6 Relationship between remains pore water pressure and impact number

图 7 为同一试样不同冲击遍数下所表现出来的轴向应变与击数之间的关系, 其变化趋势与孔压的变化趋势有一定的相似之处。但从连续 20 击冲击试验结果可以看出^[9], 轴向变形分 3 个阶段, 前 8

击与孔压前 8 击的发展趋势相同, 呈双曲线形式增长; 8~12 击时呈缓慢增长趋势; 超过 12 击, 轴向变形则以线性速率增长。整体来看, 轴向变形的发展趋势遵从双曲线-对数关系。

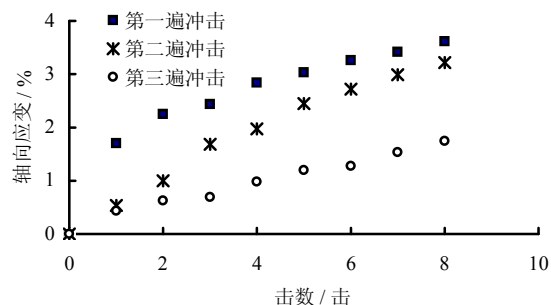


图 7 轴向应变随击数变化曲线

Fig. 7 Relationship between axial strain and impact number

图 8 为 3 个试样第一遍冲击瞬态孔压与击数之间的关系, 即在不同围压下, 相同的能量激发的孔压值基本是相同的, 这与白冰所做的人工制备土样所得的结果是基本一致的。

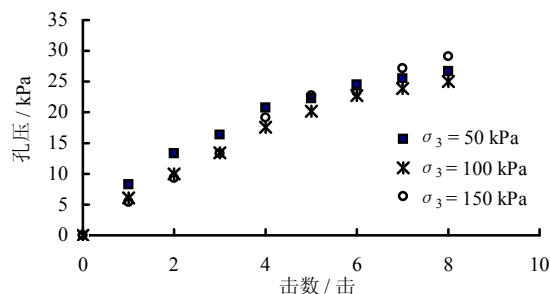


图 8 第一遍冲击瞬态孔压随击数变化曲线

Fig. 8 Relationship between pore water pressure and impact number

图 9, 10 为三轴 CU 剪切结果。由图 9 试样的应力-应变关系曲线可以分析试样的破坏强度, 在同一围压下 (50 kPa), 经过动力固结处理的试样的破坏强度高于未经动力固结的试样的破坏强度。图中曲线基本属于有峰值和稳定值型的, 经动力固结后的试样破坏点均在应变为 9%~10% 左右, 原状试样的破坏点在轴向应变为 5% 左右处。说明经动力固结后, 土样能承受较大变形而不易产生强度破坏。通过对曲线的形状分析可以认为, 土样的结构性比较弱。由图 10 可见, 当试样达到破坏点之前, 试样中的孔压基本上已达到峰值, 小围压下试样的孔压在达到破坏点之前已经开始降低。

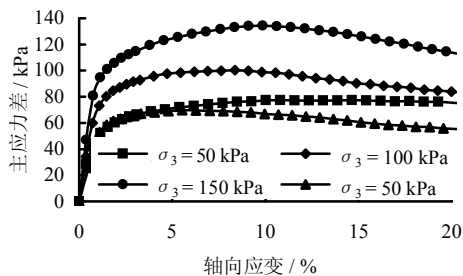


图9 主应力差与轴向应变关系

Fig. 9 Relationship between stress and axial strain

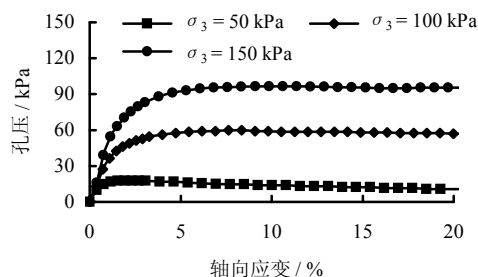


图10 孔压与轴向应变关系

Fig. 10 Relationship between pore water pressure and axial strain

5 结语

(1) 试验结果表明, 室内动力固结试验模拟现场强夯是可行的, 冲击荷载对于淤泥质饱和软粘土的固结作用效果是明显的。在冲击荷载施加过程中, 用 RSM-24FD 浮点动测仪采集到的冲击瞬间动应力、动孔压的波形比较明显, 其变化规律也反映了土体在冲击荷载作用下的动态响应特征。

(2) 冲击荷载施加过程中, 土体中孔压增长

与变形规律具有一定联系, 但又遵循不同的发展模式, 孔隙水压力服从双曲线的发展模式, 而轴向变形则要用双曲线-对数模式加以拟合。

(3) 由于试样中心设有砂芯, 起到了良好的排水固结作用, 但孔压传感器与砂芯贯通, 所以, 在每遍冲击荷载施加后对试样进行排水固结时, 未能观测孔压的消散过程。在以后的研究中, 需要改进试验方法。

参考文献

- [1] 蔡伟铭, 胡中雄. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. 345—366.
- [2] 白冰, 刘祖德. 冲击荷载作用下饱和软粘土孔压增长与消散规律[J]. 岩土力学, 1998, 19(6): 33—38.
- [3] 白冰, 周健, 曹宇春. 冲击荷载作用下软粘土变形和孔压的若干问题[J]. 同济大学学报, 2001, 29(3): 269—272.
- [4] 曾庆军, 周波, 龚晓南. 冲击荷载下饱和粘土孔压特性初探[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 427—431.
- [5] 李彰明, 冯遗兴. 软基处理中孔隙水压力变化规律与分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 97—102.
- [6] 丘建金, 张旷成. 动力排水固结法在软基加固工程中的应用[J]. 工程勘察, 1995, (6): 7—10.
- [7] 徐金明, 陈文财, 张剑峰. 强夯法加固软土地基的现场对比试验研究[J]. 工程勘察, 1996, (2): 19—22.
- [8] 陈凡. 饱和土在冲击荷载作用下的动力特性[硕士学位论文 D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所. 1983.
- [9] 孟庆山. 淤泥质粘土在冲击荷载下固结机理研究及应用[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所. 2003.

简讯

近两年《岩土力学》基本情况统计概况

由中国科学院文献情报中心、中国社会科学院文献信息中心、北京大学图书馆、南京大学中国社会科学研究评价中心、武汉大学中国科学评价研究中心、清华大学中国学术期刊(光盘版)电子杂志社联合主办的“第二届中国科学文献计量与评价研究学术研讨会”2003年12月23—26日在北京举行。科学技术部、教育部、中国科学院、国家自然科学基金委员会联合发布了“关于改进科学技术评价工作的决定”, 主要精神有: 明确科学技术评价中的主要问题, 充分认识改进科学技术评价工作的紧迫性和重要性; 加强宏观指导, 明确职能定位, 正确引导科学技术评价工作; 区别不同评价对象, 明确各类评价目标, 完善各类评价体系; 坚持“公平、公正、公开”的评价原则, 建立与国际接轨的评价制度, 规范科学技术评价行为等。

据清华大学中国学术期刊(光盘版)电子杂志社首次出版的2002年版《中国学术期刊综合引证报告》统计, 2001年《岩土力学》论文载文量为125篇, 被引频次215次, 其影响因子为0.3807。在自然科学总被引频次分类排序 ZK2.2.3 科技与生活\理论\力学类中排名第9; 在自然科学影响因子分类科技与生活\理论\力学类中排名第7。

据中国科学技术信息研究所出版的2002年, 2003年版《中国科技期刊引证报告》统计, 在2879种中国科技期刊论文统计源期刊中, 2001年《岩土力学》125篇论文被引频次192次, 影响因子为0.318。按影响因子排序\力学类排名为第7, 按总引频次排序\力学类排名为第7。在2879种科技期刊影响因子总排序中位于633名, 总引频次总排序中位于747名。2002年载文量为188篇, 影响因子为0.364, 参考文献量为1467条, 平均引文量为7.8条/篇(国际为15条/篇, 国内为6条/篇), 平均作者数为2.92名, 基金论文比为0.34, 他引总引比为0.81, 引用刊数84种。在1534种科技期刊统计源中, 按影响因子排序\力学类排名为第6, 按总引频次排序排名为第7, 在1534种科技期刊统计源中影响因子总排序表中位于406名, 在总引频次总排序表中位于561名。

(赵凌 供稿)