

文章编号: 1000-7598-(2005)01-0017-05

冲击荷载下饱和软土动态响应特征的试验研究

孟庆山, 汪 稔

(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)

摘 要: 基于现场动力排水固结法加固饱和软土地基工程实践和室内动力固结试验, 结合土体压力分析了饱和软粘土在冲击荷载作用下的变形与孔压的发展变化规律。研究表明: 冲击荷载引起土体变形和激发的孔压具有不同发展模式, 土体变形与冲击击数是对数双曲线关系, 而孔压与冲击击数之间仅是双曲线关系。

关 键 词: 冲击荷载; 饱和软土; 轴向变形; 孔压

中图分类号: TU 413.5 文献标识码: A

Experimental study on dynamic characteristics of saturated soft clay under impact loading

MENG Qing-shan, WANG Ren

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

Abstract: Based on in site test of soft clay foundation treated with dynamic consolidation by drainage and dynamic consolidation tests in lab, the dynamic characteristics of strain and pore water pressure of soft clays under impact loading were analyzed associated with soil pressures. The study has shown that the axial strain and pore water pressures with impact number have different development models. The relationship between axial strain and impact number is of hyperbolic-logarithm function, and the development model between pore water pressure and impact number is of hyperbolic function.

Keywords: impact loading; saturated soft clay; axial strain; pore water pressure

1 前 言

用强夯法加固饱和软粘土地基时,土体变形和孔压在动荷载施加过程中所表现的动态响应规律是调整强夯施工工艺的重要依据^[1,2]。已有学者利用室内小型的模型试验分别模拟了在冲击荷载作用下,饱和粘土的卸荷体缩对孔压消散的影响;黄土的强度特征和结构变化机理以及砂土的变形和流动效应,但在利用数值分析方法预测孔压在夯后的消散中,计算参数的选取全凭经验^[3-5]。孔令伟^[6]利用传递矩阵法对层状地基内饱和土层在强夯作用下的性状进行了耦合分析,直接获得了孔隙水压力的响应规律。白冰^[7]通过动力排水固结法成功实践,揭示出动、静荷载联合作用加固软土地基的实质,即利用动荷载较大的冲击能激发较高的孔压,在静荷

载作用下孔压得以消散,土体再固结变形,强度进而提高。并且提出了冲击次数“阈值”和“界限孔隙水压力”的概念,对孔压、变形和强度提出了相应的计算模式,并加以验证。

本文利用动力排水固结法加固饱和软土地基的现场试验资料和室内动力固结试验测试数据,结合土压力的变化,对冲击荷载作用下的土体变形和冲击能量激发的孔隙水压力动态响应规律进行了分析,建立了孔压和变形的不同的发展模式,对于现场监测和信息化指导施工具有参考价值。

2 试验方案

2.1 现场试验情况

工程地质条件见文献[8],处理场地为沿海淤泥质饱和软土地基,场地为海滩-海滨区的一个大水

收稿日期: 2004-01-06 修改稿收到日期: 2004-03-02

基金项目: 湖北省自然科学基金(2004ABA024)和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(Q220302)。

作者简介: 孟庆山,男,1974年生,博士,2003年毕业于中科院武汉岩土力学研究所,主要从事岩土力学和软基加固处理研究。

塘,塘底为多年沉积的淤泥及淤泥质土,厚度不均匀,最厚处达14 m左右,后经堆填开山土平整而形成现有场地,填土厚度1.7~4.5 m不等。采用插设塑料排水板为主要排水系统,以高能级强夯作为动力荷载对软土地基进行动力排水固结处理。强夯分三遍点夯,一遍满夯。第一遍点夯夯点布置为6 m×6 m正方形布置,夯击能量为2 000 kN·m,每点7击;第二遍点夯夯点也为6 m×6 m正方形布置,插在第一遍夯点中间,夯击能量为2 000 kN·m,每点7击;第三遍点夯夯点为梅花形布置,插于前两遍夯点之间,夯击能量为1 200 kN·m,每点5击;第四遍为满夯,锤印搭接1/3,每点2击夯击能量为800 kN·m。

2.2 室内试验情况

对SJ-IA应变控制式三轴剪力仪进行了改装,使其能够满足对淤泥质饱和和软粘土试样施加冲击荷载的要求。具体试验装置设计原理和设备图见文献[9]。

试样尺寸为直径 $\varphi=6.18$ 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,滤纸条与试样上下端部的透水石相连,以加快孔隙水压力的消散速度。本文利用不同冲击能量对等压固结后的试样进行动力固结,通过对动孔隙水压力和轴向应变等的测试,实现对土体的动态响应规律及其发展模式的分析。本试验共为4组,前两组试样方案为:在50 kPa围压下,同一落锤以不同落距对软土试样连续冲击20次,后两组试验方案为相同:在能量下,以不同的锤重和落距的组合对软土试样连续冲击20次,具体试验方案见表1。

表1 试验方案简表

Table 1 The schemes of experiment

试样编号	周围压力/kPa	冲击击数/击	冲击能量/N·cm
a-1	50	20	4×30
a-2	50	20	4×40
a-3	50	20	5×28
a-4	50	20	7×20

3 淤泥质软土的动力响应特征

根据室内动力固结试验,基于冲击荷载施加过程中轴向变形与孔隙水压力的动态响应特征,对变形和孔压的发展模式进行了探讨,并作如下分析。

3.1 冲击荷载下的土压力

通过对现场采集的土压力波形进行分析整理,

土动压力随冲击击数的变化情况见图1(图例括号中的数据表示测点距锤底的水平距离和竖向距离),在单点夯击能为2 000 kN·m作用下,夯点中心地表以下 $z=1.5$ m处,土动压力最大值为1 024 kPa,为夯锤静应力的34倍;在 $r=0$ m, $z=3.0$ m处,土动压力最大值为372 kPa,为夯锤静应力的12倍,可见锤底土体动应力随土体深度衰减很快。同样即使是同一深度,随着距锤中心线距离的增大,土体动应力衰减也很迅速。与已有的研究成果相吻合,土冲击荷载造成的土压力等值线为一椭球体。

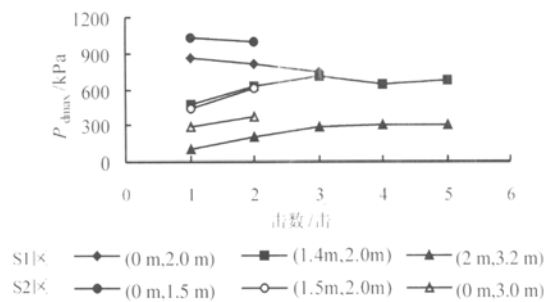


图1 第一试验区(S1)和第二试验区(S2)土动压力 P_{dmax} -击数 N 关系曲线

Fig.1 The relation of dynamic stress and impact number

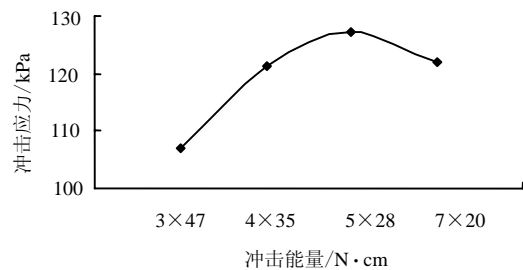


图2 冲击应力随冲击能量变化曲线

Fig.2 The relation curve between dynamic stress and impact energy

通过室内动力固结过程中不同锤重和落距的组合试验发现,相同冲击能量下,冲击应力存在一个峰值,即使是用不同锤重和低落距作用于土体的冲击应力不同,且存在一个能使冲击应力达到最佳效果的组合,如图2所示(曲线横坐标表示锤重与落距的乘积,总的冲击能量为140 N·cm)。图中峰值表明过轻的夯锤采用过高落距与过重的锤采用过低落距都不合理,这在工程实践中已经得到充分地验证。

3.2 冲击荷载下轴向变形特征

图3是淤泥质饱和和软粘土在冲击荷载作用下的轴向应变观测曲线。可以看出,随着冲击击数的增加,曲线大体可以分为3个阶段:前8击为轴向变形快速增长阶段;8~12击为轴向变形增长趋于稳定

阶段；12 击以后为轴向应变再次以几乎恒定的速率线性增长阶段。

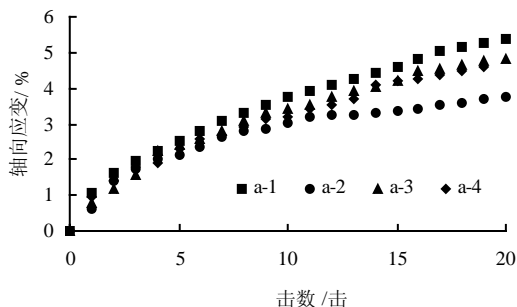


图 3 轴向应变随击数变化曲线
Fig.3 The relation of axial strain and impact number

在冲击荷载施加过程中，在开始冲击应力的作用下，试样颗粒之间的静态结构遭受破坏，土粒间微观结构定向排列发生改变，致使试样产生较大的变形；经过前一阶段后冲击固结，土粒排列呈现相对稳定状态，试样变形模量增大，变形增长的速率显著变缓；由于前两阶段能量的积累，而使试样中粘土颗粒排列的相对稳定状态重新遭到破坏，于是进入变形速率重新增加的第三阶段。

通过拟合分析，轴向应变在取对数值后，其结果与冲击击数呈双曲线对应关系。拟合方程为：

$$\ln \varepsilon_a = \frac{N}{a_1 + b_1 N} \quad (1)$$

式中 ε_a 为轴向应变； N 为冲击击数； a_1 ， b_1 为变形参数。

按照式 (1) 绘出 $N/\ln \varepsilon_a - N$ 曲线，发现呈线性关系，见图 4 和图 5，直线在纵坐标的截距为 a_1 ，直线的斜率为 b_1 。

从式 (1) 可见，轴向应变的初始增长率为 $1/a_1$ ， $\ln \varepsilon_a - N$ 曲线中，轴向应变值 $\ln \varepsilon_a = 1/b_1$ 。

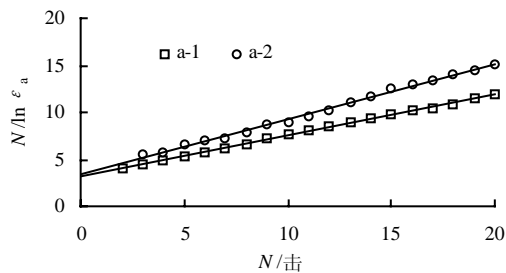


图 4 不同能量 ε_a 拟合后发展曲线
Fig.4 The development curve of axial strain under different energy

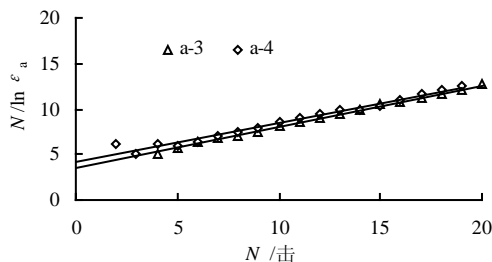


图 5 相同能量 ε_{am} 拟合后发展曲线
Fig.5 The development curve of axial strain under same energy

图 4 和图 5 分别为同一重锤不同冲击能量、相同冲击能量以不同锤重和落距组合下的冲击荷载作用于土体，试样的轴向应变的对数值与击数 N 的关系曲线，各曲线均呈良好的线性关系，由图 4、5 及表 2 可见：在用同一锤重不同能量冲击下，直线截距基本相同，斜率有所不同，无论能量大小，冲击荷载所引起的轴向应变增速基本一致，由于原状土的不均匀性，试样残余的轴向应变规律性不强。见图 4 相同冲击能量下不同锤重和落距的组合对轴向变形有一定程度的影响，各直线的斜率和截距比较接近，通过比较可以看出：重锤低落距造成的轴向应变增速慢，但轴向应变总量大，见图 5。

表 2 参数 a_1 和 b_1 值
Table 2 Parameters a and b

试样编号	a_1	b_1	相关系数 R^2
a-1	3.128	0.437	0.999 2
a-2	3.418 1	0.584 2	0.995
a-3	3.511 5	0.454 6	0.995 8
a-4	4.249 2	0.424 3	0.976 4

3.3 冲击荷载下孔压增长特征

图 6 是冲击荷载施加瞬间孔压随击数增加的变化曲线，孔压增长曲线表现出较为明显的 2 个阶段：前 8 击左右孔压以较快的速率增长；而 8 击以后，孔压以速率渐缓的趋势增长，并逐渐趋于一稳定值。

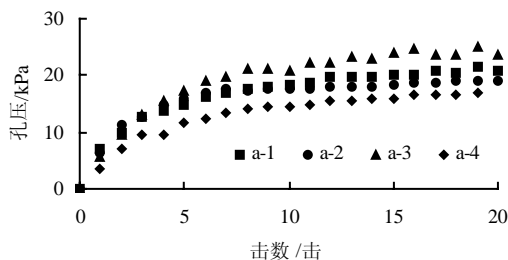


图 6 孔压峰值随击数变化曲线
Fig.6 The relation of pore water pressure and impact number under same energy

由于孔压的发展模式与轴向应变不同，所以其拟合形式也就有所不同，根据曲线拟合结果，孔压增长与冲击击数之间呈双曲线关系，拟合方程为：

$$u = \frac{\frac{N}{N_f}}{a_2 + b_2 \frac{N}{N_f}} \quad (2)$$

式中 u 为孔隙水压力； N 为冲击击数； N_f 为孔压达到稳定值时对应的冲击击数； a_2 和 b_2 为孔压参数。

按照式(2)绘出 $(\frac{N}{N_f}) - (\frac{N}{N_f})$ 曲线为良好的

直线关系，见图 7 和图 8，该直线在纵坐标的截距为 a_2 ，直线的斜率为 b_2 。

从式(2)可见，孔压的初始增长率为 $1/a_2$ ， $u - (\frac{N}{N_f})$ 曲线的最终渐近线为 $u_{max} = 1/b_2$ 。

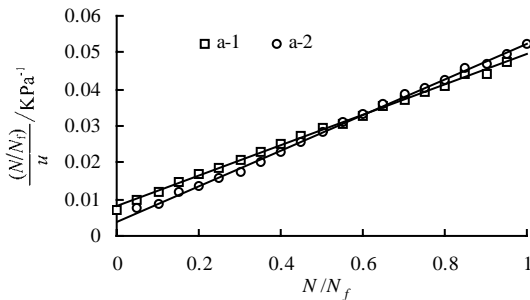


图 7 不同能量拟合后孔压发展曲线

Fig.7 The development curve of pore water pressure under different energy and impact number under same energy

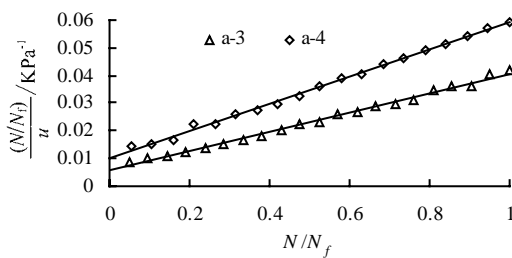


图 8 相同能量拟合后孔压发展曲线

Fig.8 The development curve of pore water pressure under same energy and impact number under same energy

图 7 和图 8 分别为同一重锤不同冲击能量、相同冲击能量不同锤重和落距组合冲击荷载激发的孔压 u 与 N/N_f 的关系曲线，各曲线的均呈良好的线性关系，由两图及表 3 可见：同一重锤不同能量冲击下，各直线的斜率比较接近，截距相差不大，说明不同冲击能量引起的最大孔压基本接近，而孔压的增长速率随冲击能量的增大而增大，见图 7；相

同冲击能量下不同锤重和落距的组合比照同一重锤不同能量对冲击结果影响的程度大，各直线的斜率和截距均有较大差别，由于原状土的不均匀性，所以结果具有一定的离散性，总的来看是重锤低落距，激发的孔压小，且孔压的增长速率慢，见图 8。

表 3 参数 a_2 和 b_2 值

试样编号	a_2	b_2	相关系数 R^2
a-1	0.008	0.0418	0.9985
a-2	0.0041	0.0483	0.9981
a-3	0.0056	0.035	0.9942
a-4	0.0103	0.049	0.9966

值得注意的是，公式(1)和(2)所拟合的变形和孔压的发展模式仅适用于强夯情况，即利用较大的冲击能量，产生较大的变形，并能激发出较大的孔压。对于静载以及重锤夯实情况并不适用。

动力排水固结处理饱和软土地基的现场试验中，孔隙水压力增量及夯坑沉降量随夯击击数变化情况见图 9 (r 为测点距夯点中心距离， z 为测点深度)。由图中曲线可见：随着夯击数的增多，孔压增量是逐渐增大的。参考夯坑沉降量数据可以解释为：根据有效应力原理，当夯锤的冲击荷载产生的总应力保持不变时，在夯击过程中，每击间孔压增量是一个减小的趋势，总的孔隙水压力呈缓慢增大的趋势，因而作用在土体中的有效应力呈缓慢减小的趋势。当土体中某点孔压等于上覆土压力和土体内聚力之和时，土体中的有效应力完全消失，土体的抗剪强度为 0，土颗粒处于悬浮状态—达到局部液化，土骨架连结完全破坏，土体强度降至最低。从图中可以看出，夯坑下沉量与击间孔压增量具有一定的对应关系，所以在实际工程中，将夯坑下沉量作为收锤标准是有一定道理的。对孔压的监测，更能有效地确定强夯施工参数。

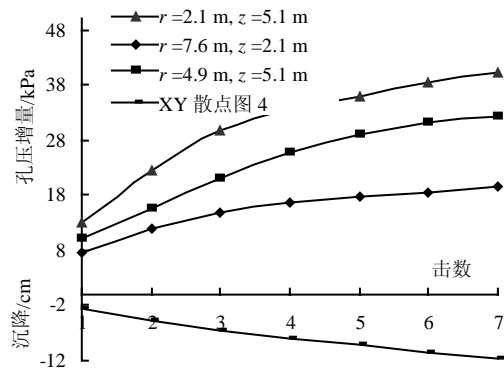


图 9 孔压增量及沉降量与夯击击数关系曲线
Fig.9 The relation of pore water pressure and deformation with impact number

4 结语

(1) 锤底土体动应力随土体深度和距夯坑距离的增大衰减很快。现场实践和室内动力固结试验表明: 相同冲击能量下, 存在一个能使冲击应力达到最佳效果的不同锤重和落距的组合。

(2) 在冲击荷载作用下, 软粘土轴向变形随冲击过程可以分为快速增长阶段、趋于稳定阶段和平稳线性增长3个阶段; 而孔压只相应出现快速增长阶段和稳定平缓增长2个阶段。

(3) 冲击荷载作用下饱和软粘土的轴向变形和孔隙水压力具有不同的动态响应特征, 即轴向变形和孔压有着不同发展模式, 轴向变形与冲击击数之间遵循对数双曲线的对应关系, 而孔隙水压力与冲击击数之间则遵循双曲线对应关系。

参 考 文 献

- [1] 郑颖人, 李学志, 冯遗兴, 等. 软粘土地基的强夯机理及其工艺研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 571—579.
ZHENG Ying-ren, LI Zhi-xue, FENG Yi-xing et al. Study on the DCM mechanisms and engineering techniques of soft clay foundation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(5): 571—579.
- [2] 周健, 曹宇, 贾敏才, 等. 强夯—降水联合加固饱和软土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 376—380.
ZHOU Jian, CAO Yu, JIA Min-cai et al. In-situ test study on soft soils improvement by the DCM combined with dewatering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 376—380.
- [3] Chow Y K. Dynamic compaction analysis[J]. **ASCE**, 1992, 118(8): 1141—1157.
- [4] Qian J H. et al. Dynamic consolidation for a clay foundation with sand package[A]. **5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics**[C]. Nagoya: [s.n]. 1985.
- [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.
LI Zhang-ming, FENG Yi-xing. Rule and analysis on pore water pressure during soft clay foundation treating[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(6): 97—102.
- [6] 孔令伟. 强夯机制与加固效应研究[博士学位论文 D]. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1997.
- [7] 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.
BAI Bing, ZHOU Jian, CAO Yu-chun. Some problems on the deformation and pore pressure of soft clay under impact loading[J]. **Journal of Tongji University**, 2001, 29(3): 269—272.
- [8] 孟庆山, 王吉利, 汪稔. 采用不同加固方案处理软土地基的对比研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 375—377.
MENG Qingshan, WANG Ji-li, WANG Ren. Contrast study on consolidation of soft clay foundation with different methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 375—377.
- [9] 孟庆山, 汪稔, 王吉利. 动力排水固结法处理软基孔压和变形问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1738—1741.
MENG Qingshan, WANG Ren, WANG Ji-li. Study on pore water pressure and deformation of soft clay compacted with dynamic consolidation by drainage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1738—1741.