

文章编号: 0559-9350(2005)04-0467-06

## 冲击荷载下饱和软黏土的孔压和变形特性

孟庆山, 汪稔, 刘观仕

(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: 利用室内动力固结试验装置, 对淤泥质饱和软黏土施加冲击荷载, 分析在不同围压下施加不同的冲击能量时试样所受的冲击应力、孔隙水压力和轴向变形, 发现锤重和落距的组合是影响冲击应力的主要因素。试验表明, 轴向变形与冲击次数之间呈对数—双曲线关系, 孔隙水压力与冲击次数之间呈单纯的双曲线关系。将室内试验结果同现场测试资料对比表明, 模型能较好地模拟现场强夯法处理饱和软土地基。

关键词: 软土地基; 冲击荷载; 孔隙水压力; 轴向应变

中图分类号: TU413.5

文献标识码: A

动力排水固结法能有效加固饱和软土地基, 这已经得到岩土理论界和工程界的一致认可。它集合了强夯法和排水固结法两者的优势, 利用动、静荷载相结合, 对饱和软黏土地基进行固结处理<sup>[1,2]</sup>。动荷载产生的瞬时压密和所激发的高孔隙水压力是显著的, 而填土静荷载和布置在软土层内部以及上覆填土层中的空间排水系统的存在, 使得高孔隙水压力在强夯间歇期间快速消散, 沉降加快完成, 地基强度得以提高。以往的现场研究主要集中在孔隙水压力的长消、沉降的发展以及强夯前后土的工程力学参数的原位测试上<sup>[3~6]</sup>, 在室内试验方面则侧重于对重塑软土试样或人工制备样施加冲击荷载, 以此研究饱和软黏土的应力、孔压、变形等的发展规律及强夯施工工艺<sup>[7~9]</sup>。这些对于动力排水固结法加固饱和软土地基的宏观、微观以及波动机理的解释都是有益的<sup>[10,11]</sup>, 但对于更加接近于现场实际情况的原状土试样的室内动力固结模拟试验进行的则较少, 涉及冲击荷载施加瞬间试样的动力响应特征的研究更显不足。这与取得理想原状土难度大不无关系, 同时更大程度上也要求确保测试仪器本身的精度和可靠性。本文利用工程浮点动测仪完成冲击荷载对较为理想的原状土试样冲击瞬间的冲击应力、孔压和变形的动态信号采集。原状土样的不均匀性势必造成试验结果具有一定的离散性, 但冲击荷载作用下软黏土的基本动态响应规律依然可循, 本文即在这一方面作一些研究。

## 1 室内动力固结试验

1.1 试验装置、试样及试验方法 对 SJ-1A 应变控制式三轴剪力仪进行改装, 以实现淤泥质饱和软黏土试样(原状样)施加冲击荷载的功能。利用 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。本试验采用静力标定方法对应力、孔压传感器进行标定。试验装置如图 1 所示。

土样取自广西沿海地区, 该地区第四系地层分布较广, 主要为黏土、粉质黏土和淤泥质黏土、粉细砂、淤泥质砂和淤泥等各类土层。土层结构松软, 固结程度和强度低, 变形大, 压缩性高, 承载力低, 地基稳定性差。待处理场地为海滩—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

收稿日期: 2004-03-01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412704); 湖北省自然科学基金项目(2004BA02A)

作者简介: 孟庆山(1974—), 男, 河北玉田人, 博士, 主要从事岩土力学和软基加固处理研究。

大,最厚处达 14m 左右,后经填土平整形成现有场地,填土厚度 1.7~4.5m。

采用 TB100A 不锈钢敞口薄壁取土器在钻孔中对淤泥质软土进行静压连续取样,封存于铁皮取样桶内并用石蜡融化密封,在运输过程中避免振动。在试验室内将土样静固于切样器上,用细钢丝,以极小的切削量将土样制备成直径  $\Phi=6.18\text{cm}$ ,高度  $h\approx 12\text{cm}$  的形状。为避免土样受到大的扰动,采用抽气饱和法使试样的饱和度  $S_r$  达到 93% 以上。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。为了更好地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布置(间距为 1.2m,排水板宽 10cm,周围填砂直径 12cm),考虑到每一夯点的加固范围,按照 1:100 的长度相似比,在固定支架上以直径为 6mm 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。

**1.2 试验方案** 本文重点研究原状土样在三轴仪压力室内一定围压下完成主固结,分别利用不同冲击能量对试样进行动力固结,通过对冲击动应力、动孔隙水压力、残余孔压、轴向应变等测量值的比较,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 1。其中试样 a-1 和 a-2 为在 50kPa 围压下采用同一锤重不同落距连续冲击 20 次,试样 a-3 和 a-4 为在 50kPa 围压下采用相同能量、不同锤重和落距的组合连续冲击 20 次。冲击能量的施加是通过多次试验并反馈测试结果得到的,与实际强夯能量并无严格的对应关系。

表 1 试验方案

试样编号	围压 $\sigma_3/\text{kPa}$	冲击击数 $N$	锤重 $W/\text{N}$	落距 $H/\text{cm}$	冲击能量 $/(N\cdot\text{cm})$
a-1	50	20	4	30	$4\times 30$
a-2	50	20	4	40	$4\times 40$
a-3	50	20	5	28	$5\times 28$
a-4	50	20	7	20	$7\times 20$

试验每击间隔时间为 10s,而实际强夯施工中每击间隔时间约为 300s 左右,但试验和实际强夯对土体的加载时间均为 0.04~0.06s 之间。图 2 为 RSM-24FD 浮点动测仪采集到的冲击瞬间动应力波形图,从图 2 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夯坑下部 2.0m 和 3.2m 深度处的土体应力波形均比较相似(图 3)。因此用重锤冲击试样可以模拟强夯中的动荷载,而且承载板的重量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。由此可见利用本文设计的冲击装置模拟动力排水固结加固饱和软黏土是可行的。

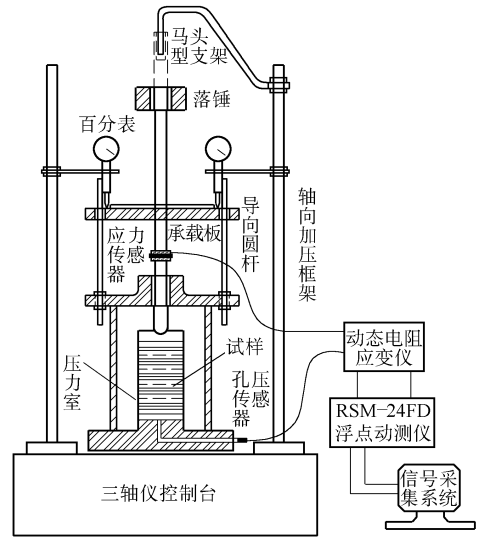


图 1 室内冲击试验装置

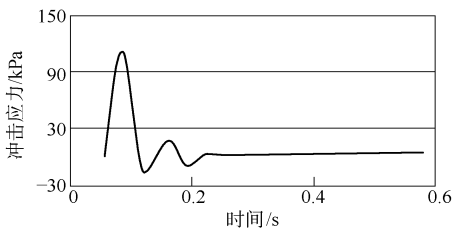


图 2 冲击应力波形

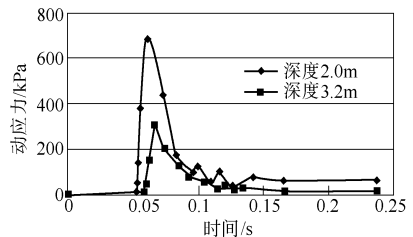


图 3 夯锤下不同深度土体动应力波形

## 2 淤泥质软土的动力响应

根据室内动力固结试验结果,对冲击荷载施加过程中冲击应力、轴向变形和孔隙水压力的动态响应特征进行分析,并初步探讨变形和孔压的发展模式。

**2.1 冲击应力特征** 图4是不同围压下4N落锤分别以25cm、35cm和45cm的落距冲击试样所采集的冲击应力峰值,相当于强夯过程中锤土接触应力值。由图中可见,同一围压下,冲击应力随冲击能量的增大而明显增大,相同的冲击能量,高围压下土样所受的冲击应力大。

图5是同一围压(50kPa)、同一冲击能量(140N·cm)下不同锤重和落距的组合所测得的冲击应力值。由图中波形出现一个峰值可见,即使冲击能量相同,不同的锤重和落距存在一个最佳的组合,在本组试验中5N×28cm组合产生的冲击应力最大,因此在实际强夯设计时应根据土性的不同选取适当的夯锤和落距。

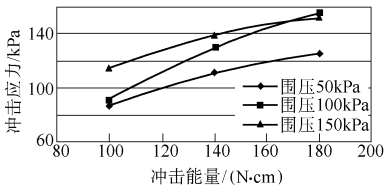


图4 冲击应力随冲击能量变化曲线

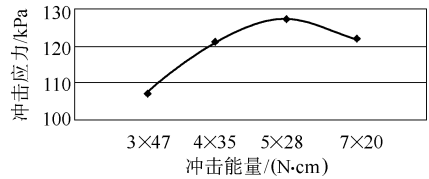


图5 冲击应力随冲击能量变化曲线

**2.2 轴向变形特征** 图6为不同试验方案(见表1)下轴向应变随冲击荷载增长的变化曲线。由图6可见,曲线大致可以分为3个阶段:前8击为快速增长阶段,轴向应变随冲击击数以速率递减的趋势快速增长;8~12击为变形趋于相对稳定阶段,轴向应变增长速率比第一阶段有所减缓,并出现稳定的态势;12击以后为稳定增长阶段,轴向应变再次以几乎恒定的速率线性增长。

上述变形特性主要与动荷载作用下黏土颗粒排列的变化有关,在初始冲击应力的作用下,试样颗粒之间的静态结构遭到破坏,大孔隙向中小孔隙转化,致使试样以较大的变形速率产生较大的变形量;随着能量的不断施加,中小孔隙之间颗粒接触较好,胶结力充分发挥作用,颗粒排列呈现相对稳定状态,此时,试样抵抗变形的能力得到加强,变形增长的速率显著变缓;继续冲击,中小孔隙逐渐向微孔隙转变,变形量的进一步积累,试样中黏土颗粒的接触点受到破坏,排列的相对稳定状态重新遭到破坏,最后终因变形量积累过大而出现剪切破坏。

通过曲线拟合分析,轴向应变在取对数后与冲击击数呈双曲线对应关系,拟合方程为

$$\ln \epsilon_a = \frac{N}{a + bN} \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_a$  为轴向应变;  $N$  为冲击击数;  $a$ 、 $b$  为变形参数。

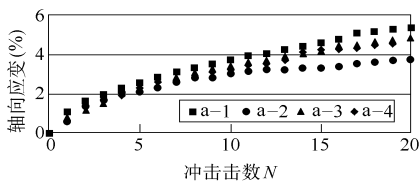


图6 轴向应变随击数变化曲线

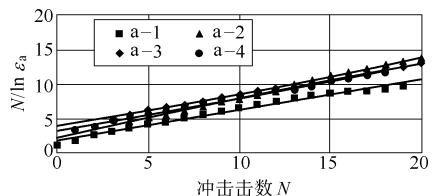


图7 轴向应变的发展拟合曲线

按照式(1)绘出  $N/\ln \epsilon_a \sim N$  曲线如图7,图7为不同锤重和落距组合下冲击荷载作用于土体,试样的轴向应变的对数值与  $N$  的关系曲线,各曲线均呈良好的线性关系,直线的纵截距为  $a$ ,斜率为  $b$ 。综合表2可见:(1)同一锤重不同冲击能量下,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,如a-1和

a-2; (2)相同冲击能量下不同锤重和落距的组合对轴向变形也有一定程度的影响,各直线的斜率和截距比较接近,通过对比可以看出,重锤低落距造成的轴向应变增速慢,但轴向应变总量大,如 a-3 和 a-4。

表2 参数 a 和 b 值

试样编号	a	b	相关系数 R <sup>2</sup>
a-1	0.0080	0.0418	0.9985
a-2	0.0041	0.0483	0.9981
a-3	0.0056	0.0350	0.9942
a-4	0.0103	0.0490	0.9966

表3 参数 a 和 b 值

试样编号	a	b	相关系数 R <sup>2</sup>
a-1	3.1280	0.4370	0.9992
a-2	3.4181	0.5842	0.9950
a-3	3.5115	0.4546	0.9958
a-4	4.2492	0.4243	0.9764

2.3 孔隙水压力增长特征 图8是不同试验方案下冲击荷载施加瞬间孔压随击数增加的变化曲线。由图8可见,孔压增长曲线表现出较为明显的两个阶段:前8击左右孔压以较快的速率增长,且增长速率逐击递减;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。由于本文试验采用原状样,因而试样的物理力学状态难免有所差异,而且试样的结构性较强,在运输、备样以及试样安装过程中不可避免地会受到扰动。如试样 a-1 含水量偏高,本身强度同比偏低,因此小能量冲击下轴向变形和孔压均相应偏大,但总的来看,试验所反映出来的基本规律还是存在的。

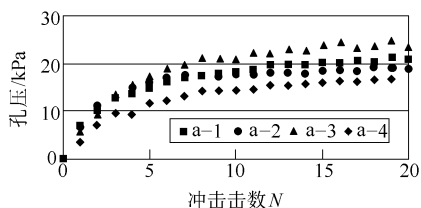


图8 孔压峰值随击数的变化曲线

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

$$u = \frac{N/N_f}{a + bN/N_f} \quad (2)$$

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;  $a$ 、 $b$  为孔压参数。

图9为不同锤重和落距组合下冲击荷载激发的孔压  $u$  与  $N/N_f$  的关系曲线。由图9可见,各曲线均呈良好的线性关系,综合表3可见:(1)同一锤重不同冲击能量下,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,如 a-1 和 a-2;(2)相同冲击能量下不同锤重和落距的组合比同一锤重不同冲击能量对冲击结果的影响程度大,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,所以试验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,如 a-3 和 a-4。

图10给出了试样经过动力排水固结后三轴剪切试验(CU剪)的应力-应变关系,同时给出了原状试样在同一围压下的CU剪试验结果,以作对比。由图10可见,经动力排水固结处理的试样 a-2~a-4 的强度几乎是原状试样强度的两倍,由于试样本身的不均匀性,以及施加的能量偏低,亦或备样、装样过程中的些许扰动,试样 a-1 的强度比 a-2~a-4 低很多,但仍然略高于原状试样,由此可见,室内试验取得了良好的效果,基本达到了模拟动力排水固结法加固软土地基的目的。

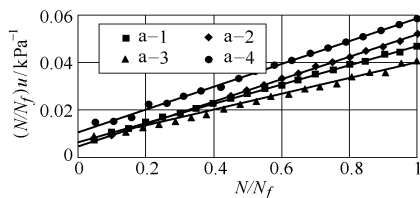


图9 拟合后的孔压发展曲线

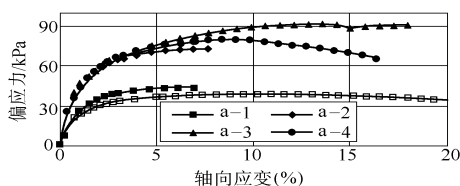


图10 动力固结后试样的应力应变关系

### 3 孔压、变形联合确定冲击数

既然孔压和变形有着不同的发展模式,那么定义孔变比  $u/\epsilon_a$  表征土体在变形中孔隙水压力与土体

变形增长速率的相对量度, 分析其与冲击击数之间的对应关系, 绘出不同试验方案下  $u/\varepsilon_a \sim N$  曲线如图 11 所示。

由图 11 可见, 与孔压、变形曲线相同, 孔变比在前 8 击有较大幅度的下降; 8 击~12 击前后出现了较为稳定的阶段; 超过 12 击后, 孔变比又以一定的速率开始下降。联合考虑孔压和变形同一时刻的动力特性表现, 当冲击荷载开始施加时, 土体抵抗外力变形的能力较差, 落锤冲击使得土体中大孔隙向中小孔隙发展, 导致试样产生较大的轴向变形, 比侧向变形占优势, 以自由水为主体的孔隙水压力逐击上升; 随着轴向所受冲击能量的不断加大, 土体内部颗粒定向排列发生变化, 颗粒之间形成较好的联结, 土体的变形模量增大, 轴向抵抗外部荷载的能力不断增强, 此时土颗粒表面吸附的部分较弱的结合水被激发出来, 表现出的孔压与轴向变形增长速率相近; 随着冲击的继续进行, 不断加大的冲击能量使土体颗粒接触点发生滑移(按沈珠江结点固化变形机理解释), 稳态结构发生改变, 中小孔隙向微孔隙演变, 产生了较大的侧向变形, 这必然导致轴向变形随之加大, 此时轴向变形引起孔压的增长与侧向变形引起孔压的消散速率基本相当, 由激发出的弱结合水引起的孔压趋于稳定, 直观表现为孔变比的减小。由此将 8 击作为施加冲击荷载的最佳冲击数, 该冲击数能够确保土体不发生大的侧向变形, 并且不会造成冲击能量的浪费, 这一点在饱和软土地基实际强夯施工中已经得到了很好的验证。在实际强夯中, 锤重 150kN, 直径为 2.5m, 落距为 13.3m, 即冲击能量为 2000kN·m。夯锤的贯入量随冲击击数的变化如图 12 所示。夯锤在饱和软黏土中的单击贯入量在前 8 击随冲击击数的增加快速减小, 当夯到第 9 击时, 其贯入量明显小于前一击, 此时可以作为收锤标准。

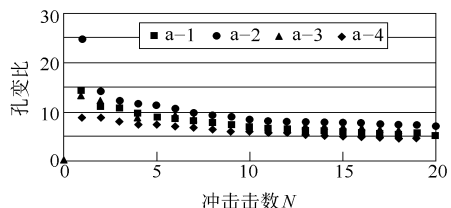


图 11 孔变比随击数变化曲线

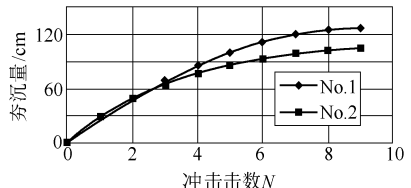


图 12 现场试验夯锤贯入度

## 4 结论

本文以室内动力固结试验装置模拟现场动力排水固结法处理饱和软土地基, 取得了满意的结果, 得到了与现场实际情况相一致的动态响应规律, 为强夯试验参数的合理选取提供了技术支持。通过分析 与讨论, 得到以下结论: (1) 淤泥质饱和软黏土在冲击荷载作用下, 冲击应力与锤重和落距的组合密切相关, 相同冲击能量下存在一个最佳的锤重和落距的组合; 土体中孔隙水压力随冲击击数符合双曲线的增长模式, 而轴向变形与冲击击数之间则遵循对数-双曲线发展模式。(2) 动力排水固结法处理淤泥质饱和软黏土地基的最佳冲击击数与土体的孔压和轴向变形有紧密联系, 由此提出在动力冲击过程中反映孔隙水压力与土体变形增长速率之间相对量度的孔变比来确定最佳冲击数。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 郑颖人, 李志学, 冯遗兴, 等. 软黏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.
- [ 2 ] Liu Z D, et al. An investigation on the constitutive law of saturated soft clay under cyclic loads[ J ]. Proc. Int. Conf. On constitutive law for Engrg., Materials, China, 1989, (2): 734-740.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 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
- [ 5 ] 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

- [ 6 ] Jessberger H L. Heavy tamping: theoretical and practical aspects[ J ] . Soil Mechanics and Foundation Engineering Tenth Intemation Conference, 1981, (3): 695— 699.
- [ 7 ] 白冰. 饱和软黏土在冲击荷载作用下的性状研究及其应用[ D] . 武汉: 武汉水利电力大学, 1998
- [ 8 ] Scott R A, et al. Soil compaction by impact[ J] . Geotechnique, 1975, 25(1): 19— 30.
- [ 9 ] 曾庆军, 周波, 龚晓南. 冲击荷载下饱和黏土孔压特性初探[ J] . 岩土力学, 2001, 22(4): 427— 431.
- [ 10 ] 冯永疆, 王彬, 魏东. 强夯法加固机理的探讨[ J] . 勘察科学技术, 1988, (2): 27— 30
- [ 11 ] Osipov V I, et al. Microstructural change associated with thixotropic phenomena in clay soils[ J] . Geotechnique, 1984, (34) 2: 293— 303.

## Experimental study on pore water pressure and axial strain of saturated soft clay under impact load

MENG Qing-shan, WANG Ren, LIU Guan-shi

(*Institute of Rock and Soil Mechanics, Wuhan 430071, China*)

**Abstract:** The characteristics of saturated soft clay under the action of impact load are studied in laboratory by using dynamic consolidation equipment. The impact stress, pore water pressure and axial strain of the soft clay with different confining pressures under the impacts with different energies are measured. It is found that the combination of the hammer weight and dropping height is the main factor influencing the impact stress. Experimental result shows that the relationship between axial strain and impact number is a hyperbolic-logarithmic function and the relationship between pore water pressure and impact number is a hyperbolic function. The comparison of experimental result with field data verifies that the compacting of soft clay foundation in-situ by means of dynamic consolidation method can be well simulated by experiments in laboratory.

**Key words:** soft clay foundation; impact loading; pore water pressure; axial strain

(责任编辑: 韩昆)

---

(上接第 466 页)

## Recomposition model of property right for water supply enterprises

MENG Ge, WANG Xian-jia

(*Wuhan University, Wuhan 430072 China*)

**Abstract:** Three modes and relevant assessment indexes are suggested for property right recomposition of water supply enterprises in Shenzhen City. The decision-making model is established. The micro-economics, property right economics, welfare economics and game theory are applied to analyze the recomposition modes. The values of correlated assessment indexes for different modes are obtained. Recommendations are suggested based on the calculation result.

**Key words:** water supply enterprise; recomposition of property right; assessment indexes; decision-making model.

(责任编辑: 王成丽)