

文章编号:1673-0291(2011)04-0073-05

## 冲击荷载作用下饱和粉土变形和强度试验

陈星欣, 白冰, 席连海

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 围海造地是解决土地紧张的有效途径, 其中对软弱吹填土地基进行有效加固处理是围海造地的关键。结合强夯法加固饱和粉土地基的工程实例, 通过 MTS 动三轴试验研究强夯冲击荷载作用对饱和粉土的变形和强度特性的影响。通过动三轴试验采用不同的围压、冲击次数和冲击能量对饱和吹填粉土进行动力固结, 结合静三轴试验对比分析了不同的冲击荷载作用后试样强度的变化特征。结果表明: 冲击次数和冲击能量是影响饱和粉土地基加固效果的重要因素, 存在一个最佳的夯击方式, 在该方式下强夯的效果最好。

**关键词:** 强夯法; 饱和粉土; 试验研究

中图分类号: TU431.5; U416.1 文献标志码: A

## Experimental research on the deformation and strength of saturated silt soil under impact load

CHEN Xingxin, BAI Bing, Xi Lianhai

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The reclamation of land from the sea provided an effective method to solve the problem of the growing scarcity of land, and its key is the reinforcement effect of saturated silt foundation. Through the MTS dynamic triaxial test on the basis of a practical case of saturated silt foundation improved with the dynamic compaction method, this paper studies the deformation and strength of saturated silt soil under dynamic compaction load, including the size of confining pressure, the impact number, the impact energy on the deformation and the strength of silt soil, especially the strength change of soil sample under impact load. The results show that the impact number and the impact energy are important factors for saturated silt foundation reinforcement engineering, and there exists an optimal dynamic way for saturated silt foundation.

**Key words:** dynamic compaction; saturated silt soil; experimental researches

随着我国经济建设的发展, 围海造地成为解决土地紧张的有效途径, 其中对软弱吹填土地基进行有效的加固处理是围海造地的关键。强夯法是加固软弱吹填粉土地基经济快速有效的方法, 可提高地基土的强度, 降低土的压缩性, 改善土的变形模量和抗液化性能。同时, 夯击能还可提高土层的均匀程度, 减少可能出现的差异沉降。

目前关于强夯法的研究主要有: 孟庆山<sup>[1]</sup>利用室内动力固结装置, 分析了淤泥质饱和软黏土在不同的围压下施加不同冲击能量时, 试样所受的冲击应力、孔隙水压力和轴向变形。王安明等<sup>[2]</sup>利用模型试验, 研究了插设塑料排水板过程、全部夯击过程及夯击完成后, 饱和软黏土内的孔压响应。赵建华等<sup>[3]</sup>利用室内模型试验, 提出了动力排水固结软土

收稿日期: 2010-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011YJS047)

作者简介: 陈星欣(1984-), 男, 湖南茶陵人, 博士生, 主要从事复杂条件下岩土介质特性研究. email: caoshangfei332@163.com.

地基有效加固深度的确定方法和加固效果的评价方法. 李丽慧<sup>[4]</sup>利用自行设计的模型装置进行了两组不同排水系统的夯击试验. 这些研究主要集中在室内模拟强夯冲击荷载下土体的动态响应等方面, 在土体加固效果方面的研究很少. 对强夯加固效果的评价手段主要有静力触探, 标贯和载荷板等原位测试, 但测试花费的时间长, 费用大. 此外, 贾敏才等<sup>[5]</sup>利用自行设计的仪器, 对夯击作用下砂性土密实的宏微观机制进行了试验研究. 牛志荣<sup>[6]</sup>研究了R波在强夯加固地基中的作用, 对研究强夯加固的效果进行了一些有益的尝试.

本文作者利用MTS微机控制液压式振动三轴试验仪, 模拟不同的冲击荷载作用下饱和吹填粉土的动力固结, 结合静三轴试验, 对不同围压、不同冲击次数和不同冲击能量的试验结果进行了对比分析, 进而对粉土地基的加固效果和机理进行研究.

## 1 试验方法

试验采用由美国MTS公司生产的、完全由计算机控制并采集数据的MTS810/TESTSTAR微机控制液压式振动三轴试验系统, 该仪器可选择采用应力或应变控制模式做单向或双向循环荷载试验, 同时可输入频率范围为0.1 Hz以上的各种波形(如方形波、随机波和正弦波等)进行试验.

### 1.1 冲击荷载模拟

强夯时, 夯击点处释放出巨大的能量, 在地基中产生强烈的振动, 并以波动形式从振源向四周传播. 关于夯锤与地表接触动应力的分析, 国内外已经做了很多研究<sup>[1,7-9]</sup>. 实测和理论分析表明, 强夯冲击荷载作用下, 表面接触应力会出现一定的波动和起伏, 但总的趋势是脉冲荷载的形式<sup>[8]</sup>. 试验冲击荷载的加载过程采用半个正弦波的形式, 如图1所示. 为了和实际情况相符, 冲击时关闭排水阀门, 冲击荷载频率设为5 Hz, 即一次冲击在0.1 s内完成, 两次冲击的间隔时间为10 s, 这样能较好的模拟强夯冲击荷载的作用. 通过一系列冲击荷载加固后, 再进行固结不排水的静三轴剪切试验, 采用剪切速率为

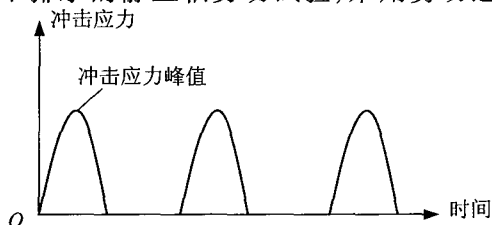


图1 冲击荷载作用形式  
Fig.1 Form of impact load

0.4 mm/min 的应变控制式剪切试验.

### 1.2 试验方案说明

所用土样取自沿海某电厂的饱和吹填粉土地基. 共进行了14个重塑土样的试验, 试样的直径 $\phi = 3.91$  cm, 高 $h = 8$  cm. 重塑土样的制备按土工试验规程<sup>[10]</sup>中的规定进行. 土样基本物理性质指标的平均值是: 液限 $w_L = 28.9\%$ , 塑限 $w_P = 20.2\%$ , 塑性指数 $I_P = 8.7$ , 根据现场吹填粉土地基土特征, 控制土样的含水率 $w = 31.8\%$ , 干重度 $\gamma_d = 16.3$  kN/m<sup>3</sup>.

采用不同的围压大小、冲击次数和冲击能量对吹填粉土进行动力加固, 然后对土样的变形和强度进行对比分析, 重点分析了动力固结后试样强度的变化, 具体试验方案如表1所示.

表1 冲击试验方案

Tab.1 Plans of the impact test

试样	围压 $\sigma_3$ / kPa	冲击应 力 / kPa	冲击 次数	试样	围压 $\sigma_3$ / kPa	冲击应 力 / kPa	冲击 次数
A1	25	0	0	C1	50	0	0
B1	25	50	1	D1	50	50	1
B2	25	50	3	D2	50	50	3
B3	25	50	5	D3	50	50	5
B4	25	70	1	D4	50	70	1
B5	25	70	3	D5	50	70	3
B6	25	70	5	D6	50	70	5

## 2 试验结果分析

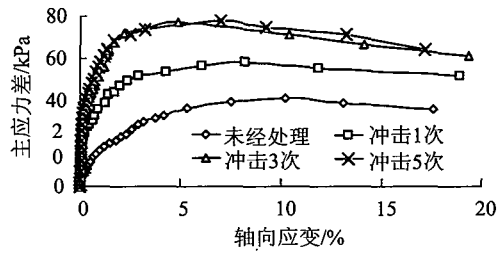
### 2.1 冲击次数影响

在围压和冲击应力相同、冲击次数不同的情况下, 当动力固结后, 对土样进行静三轴剪切试验, 其主应力差与轴向应变的关系曲线如图2所示.

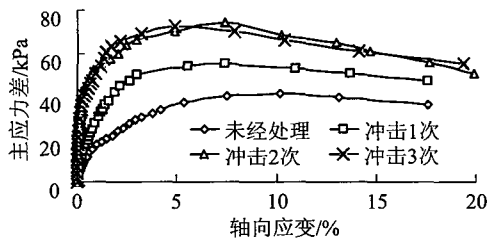
由图2可知, 在相同围压和相同冲击应力的条件下, 随冲击次数的增加, 试样的抗剪强度也相应的增加, 说明强夯法加固地基的室内试验达到了强夯加固的效果, 冲击加固后土样的抗剪强度比未经过冲击处理的土样有了很大的提高. 试样的应力-应变关系主要为软化型, 这是因为在试验所处的围压条件下, 试样的摩擦力小, 随着剪切过程的进行, 土颗粒胶结能力的丧失不能完全被摩擦力所补偿. 随着冲击次数的增加, 残余强度较峰值强度降低的程度增大, 破坏峰值逐渐明显, 说明冲击次数增加了试样的超固结程度. 此外, 对于试验所制备的土样来说, 虽然5次冲击后土样的剪切强度比3次冲击后的土样高一些, 但两者相差不大, 因此采用3次冲击的方案可大量节约工程成本.

### 2.2 冲击力的影响

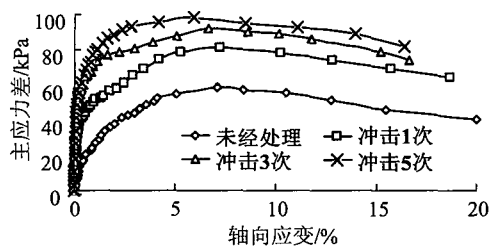
图3是在围压和冲击次数相同, 冲击应力不同的情况下, 当动力固结后, 对土样进行静三轴剪切试



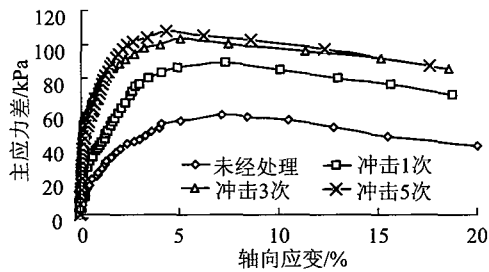
(a) 围压 25 kPa 冲击应力 50 kPa



(b) 围压 25 kPa 冲击应力 70 kPa



(c) 围压 50 kPa 冲击应力 50 kPa



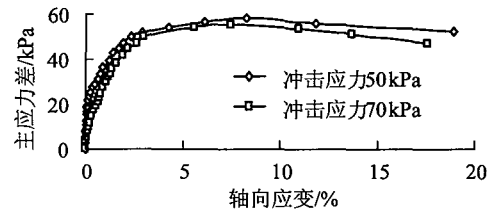
(d) 围压 50 kPa 冲击应力 70 kPa

图2 不同的冲击次数情况下主应力差与轴向应变关系曲线

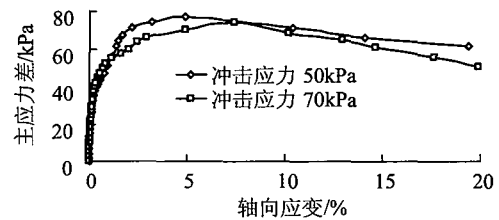
Fig.2 Relations between principal stress difference and axial strain under different impact number

验得到的主应力差与轴向应变的关系曲线。

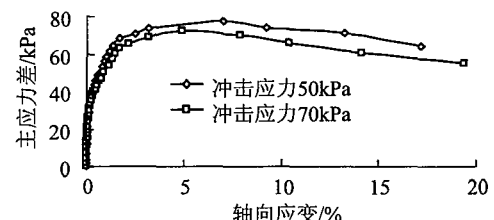
试样的抗剪强度主要来源于胶结力和摩擦力<sup>[11]</sup>,胶结力只与胶结材料的特性有关,且在变形不大时就达到了峰值,而摩擦力只有当变形发展到一定程度后才能发挥出来,摩擦力的大小与试样所受的围压和冲击力大小有关。通过对图3的分析可以看出,当土样所受围压为25 kPa时,冲击应力较小,其抗剪强度反而较大;当土样所受围压为50 kPa时,冲击应力较大,其抗剪强度较大。还可以看出,当轴向应变小于2.5%时,相同围压、相同冲击次数和不同冲击应力条件下试样的应力-应变关系大致相同,说明变形不大时,抗剪强度主要来源于胶



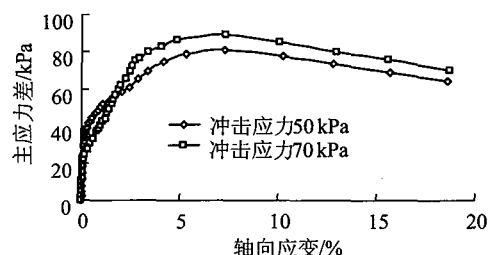
(a) 围压 25 kPa 冲击 1 次



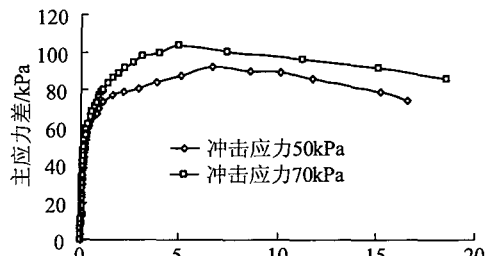
(b) 围压 25 kPa 冲击 3 次



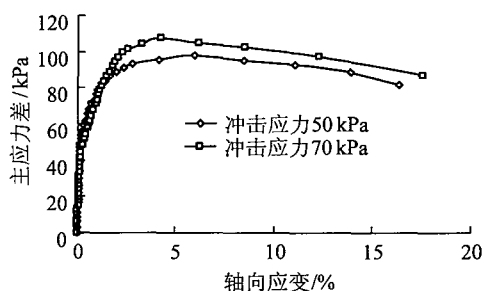
(c) 围压 25 kPa 冲击 5 次



(d) 围压 50 kPa 冲击 1 次



(e) 围压 50 kPa 冲击 3 次



(f) 围压 50 kPa 冲击 5 次

图3 不同冲击应力下主应力差与轴向应变的关系曲线

Fig.3 Relations between principal stress difference and axial strain under different impact load

结力,脆性的胶结力很快达到峰值.当围压较小时,冲击力越小,试样产生的侧向变形也越小,摩擦力的损失也相应较小,此时冲击力较小的试样的抗剪强度反而较大;当围压较大时,冲击力对侧向变形的影响很小,此时冲击力越大,试样轴向变形越大,试样更加密实,摩擦力相应也大.所以,试样抗剪强度随冲击力的增大而增大.因此,在实际工程中应根据土样所处的性质和状态,确定最佳的冲击应力值,如土样的密实程度或地层的深度等.

### 2.3 每一次冲击后的轴向变形

由图4可以看出:每次试验过程中第一次冲击的轴向变形量是最大的,能明显提高土样的抗剪切强度.当冲击次数小于3次时,围压越大,土体的单次轴向变形越小,相同围压情况下冲击应力越大,单次轴向变形越大,此时土体较松散,颗粒间孔隙较多,围压控制着土体的侧向变形,同时影响土体的轴向变形的大小.当冲击次数大于3次,不同的冲击应力和围压条件下,单次轴向变形量都很小,并趋于一个稳定的值(0.3 mm左右),此时单次的轴向变形量只与土的矿物成分,颗粒间排列等情况有关.因此,对于试验所制备的土样,冲击3次效果是最为明显的.在实际工程中,对某个点的强夯次数超过3次,实际上并不能达到很好的加固效果.

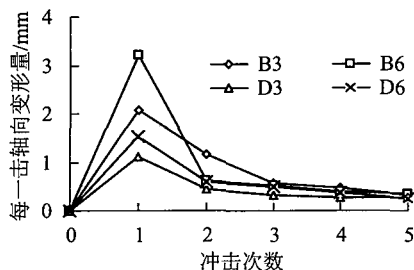


图4 每一次冲击后的轴向位移曲线

Fig. 4 Axial displacement curves after each impact

### 2.4 多次冲击累积轴向变形

由图5中可以看出,累计轴向位移可以分为3个阶段:1次冲击以后土样轴向变形急剧增大,是轴向变形的快速增长期;1~3击的轴向变形速率减缓,变形稳定增长.3击以后,轴向变形大致趋于稳定,此时夯击次数对土的变形特性影响很小.总体来说,轴向变形的速率随冲击次数的增加逐渐减缓,并趋向于某一特定的变形量.这种变形特性主要与粉土颗粒排列的变形有关,土体原始结构为松散的大孔隙结构,冲击荷载作用下,颗粒滑动或滚动到紧密状态,孔隙比随之减小,当变形达到一定量时,土体颗粒面面接触,孔隙比极小,抗变形能力得到极大的提高,很难再发生变形.

冲击力和冲击次数相同的情况下,围压越大,侧向约束越大,其轴向变形量越小,冲击加固后土样有较高的抗剪强度.围压为25 kPa和50 kPa情况下,冲击次数相同,比较不同冲击应力的累积轴向冲击变形量,得出累计轴向变形量对抗剪强度的影响,累积冲击轴向变形量越大,其冲击后土样的抗剪切能力不一定越强,要看侧向约束能力和轴向变形能力的综合作用.结合工程现场,夯击能选取不当,地基不同深度处土层的抗剪强度变化不一样,有些土体的结构可能遭到了破坏,因此,应根据需加固土层的状态选取合适的夯击能来提高夯击后的土体强度.

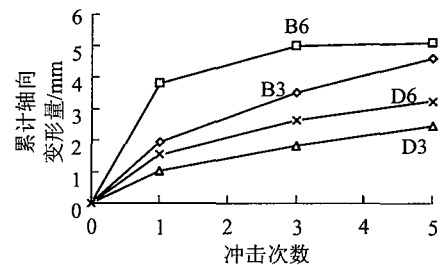


图5 多次冲击累积轴向冲击位移关系曲线

Fig. 5 Accumulated axial displacement curves after repeated impact

## 3 结论

1) 冲击次数和冲击应力的大小对冲击效果有很大的影响.当其他条件相同,冲击次数不同时,3次冲击后土样的抗剪强度与5次冲击后的土样的强度相差不大,因此建议采用3次冲击的方案;其他条件相同,冲击应力不同的情况下,不同围压条件下的冲击效果不一样,表明冲击应力的大小应根据需加固土的状态确定.

2) 通过对试验方案的多次冲击过程中轴向变形量的分析表明,前3次的单次轴向冲击变形量最明显,此时的加固效果也最好.侧向约束能力对累积冲击轴向变形量有很大影响,因此不能简单的以增加夯击能来提高夯击后的土体强度.

### 参考文献 (References):

- [1] 孟庆山, 汪稔, 刘观仕. 冲击荷载下饱和软黏土的孔压和变形特性[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 467-472.  
MENG Qingshan, WANG Ren, LIU Guanshi. Experimental study on pore water pressure and axial strain of saturated soft clay under impact load[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4): 467-472. (in Chinese)
- [2] 王安明, 李小根, 李彰明, 等. 软土动力排水固结的室内模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1643-1648.

- WANG Anming, LI Xiaogen, LI Zhangming, et al. Indoor model test of dynamic drainage consolidation method of soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1643-1648. (in Chinese)
- [3] 赵建华, 陈晓斌. 动力排水固结软基处理模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1):60-66,73.  
ZHAO Jianhua, CHEN Xiaobin. Model testing study on dynamic drainage consolidation method for soft soil foundation treatment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 60-66,73. (in Chinese)
- [4] 李丽慧, 王珊珊, 魏欣. 动力排水固结模型试验装置的研制[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 574-579.  
LI Lihui, WANG Shanshan, WEI Xin. Development of experimental apparatus for large dynamical consolidation test with drain[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4):574-579. (in Chinese)
- [5] 贾敏才, 王磊, 周健. 砂性土宏观强夯加固机制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1):3282-3290.  
JIA Micai, WANG Lei, ZHOU Jian. Experimental research on macro-meso consolidation mechanism of sandy soil with dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp1):3282-3290. (in Chinese)
- [6] 牛志荣, 路国运. 土体受冲击时 Rayleigh 波作用机制探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(6):1583-1589.  
NIU Zhirong, LU Guoyun. Discussion on mechanism and effect of rayleigh wave on soil subjected to impact loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1583-1589. (in Chinese)
- [7] 钱家欢, 钱学德, 赵维炳. 动力固结的理论与实践[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(6):1-17.  
QIAN Jiahuan, QIAN Xuede, ZHAO Weibing. The theory and practice of dynamic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(6): 1-17. (in Chinese)
- [8] 白冰, 肖宏彬. 软土工程若干理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.  
BAI Bing, XIAO Hongbin. The theory and application of soft clay engineering [M]. Beijing: The Hydraulic and Electric Press of China, 2002. (in Chinese)
- [9] 孔令伟, 袁建新. 强夯的边界接触应力与沉降特性研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2):86-92.  
KONG Lingwei, YUAN Jianxin. Study on surface contact stress and settlement properties during dynamic consolidation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 86-92. (in Chinese)
- [10] SL237-1999, 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.  
SL237-1999, Test methods of soils[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.
- [11] 陈铁林, 周成, 沈珠江. 黏土变形特性分析[J]. 岩土力学, 2004, 20(4):522-528.  
CHEN Tielin, ZHOU Cheng, SHEN Zhujiang. Analysis of deformation characteristics of clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 20(4):522-528. (in Chinese)