

# 吹填粉细砂动强度影响因素试验研究

冯波<sup>1,2</sup>, 周睿博<sup>3</sup>, 黄伟豪<sup>2</sup>, 彭海华<sup>1,2</sup>

(1. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;

2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 3. 中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 针对汕头东部经济带吹填粉细砂, 通过动三轴试验, 研究粉粒含量、黏粒含量、初始相对密实度、固结应力、固结应力比对吹填粉细砂动强度的影响规律。试验结果表明, 吹填粉细砂动强度随粉粒含量增加而降低, 破坏振次相同时, 粉粒含量为 18% 时的动强度为粉粒含量为 0 时的 1/2。动强度在粉粒含量为 6%~9% 时降低幅度出现突变, 相同破坏振次下, 降低幅度约为 22%。吹填粉细砂抗液化强度并不是随着黏粒含量的增加而单调增加的, 临界黏粒含量值为 12%。初始相对密实度对吹填粉细砂动强度影响较小。固结应力小于 200 kPa 时, 吹填粉细砂动强度随固结应力的增加而增加; 大于 200 kPa 时, 试样已接近最小孔隙比, 增加固结应力已不能增大试样密实度, 动强度不再增加。当固结比小于 2 时, 吹填粉细砂动强度随固结应力比的增加而增加。

**关键词:** 吹填砂; 粉细砂; 动强度; 动三轴试验

中图分类号: TU 43

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0137-04

## Experimental study on factors affecting dynamic strength of reclamation silty sand

FENG Bo<sup>1,2</sup>, ZHOU Rui-bo<sup>3</sup>, HUANG Wei-hao<sup>2</sup>, PENG Hai-hua<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Environmental Protection and Security of Transportation Infrastructure Projects of CCCC, Guangzhou 510230, China;

2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

3. Engineering Design Institute Co., Ltd., of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** The impact of the clay content, initial relative compactness, consolidation stress, consolidation stress ratio on the dynamic strength of reclamation silty sand in the eastern economic zone of Shantou city is studied by the dynamic triaxial test. The results show that the dynamic strength of reclamation silty sand increases with the silt content. The strength decreases 50% when the silt content increases from 0 to 18%. The dynamic strength does not monotonically increase with the increase of the clay content, and the critical value is 12%. The initial relative compactness has little influence on the dynamic strength. When the consolidation stress is less than 200 kPa, the dynamic strength will increase with the consolidation stress. The dynamic strength increases slowly when the consolidation stress is greater than 200 kPa. When the consolidation stress ratio is less than 2, the dynamic strength increases with the increase of consolidation stress ratio.

**Keywords:** reclaimed sand; silty sand; dynamic strength; dynamic triaxial test

近年来, 随着沿海地区大规模围海造陆工程建设, 规划海域许可开采区的中粗砂被大量开采, 而其下层分布的大量细砂、粉细砂因不能满足地

基排水和抗液化设计要求, 往往不被围海造陆陆域形成设计和施工采用, 导致海域砂资源浪费, 加剧了围海造陆陆域回填砂料供应缺口。充分利

收稿日期: 2015-11-18

作者简介: 冯波 (1982—), 男, 博士、高级工程师, 从事地质工程、岩土工程方面的研究工作。

用细砂、粉细砂作为围海造陆陆域回填料,可有效缓解陆域回填砂需求量严重不足的局面。

关于砂土动强度影响因素的研究, D'appolonia 第一次考虑了粉粒和黏粒含量的影响, 随后 Lee 等<sup>[1]</sup>提出黏粒和粉粒对土动强度的影响, 由此引起人们对粉粒和黏粒含量对土的动强度或抗液化强度的关注。国内学者吴建平<sup>[2-6]</sup>对砂土抗液化影响因素做了不同程度的研究, 但关于吹填砂的研究成果较少。吹填粉细砂的动力特性研究是围海造陆吹填粉细砂地基抗震液化研究的基础。本文利用 GDS 动三轴试验仪, 开展了不同粉粒含量、不同黏粒含量、不同初始相对密实度、不同固结应力、不同固结应力比条件下吹填粉细砂动强度试验, 分析了不同试验条件下吹填粉细砂动强度变化规律。

## 1 试样制备与工况设计

### 1.1 试样制备

试验所用砂土取自汕头东部经济带塔岗围片区吹填粉细砂。为了消除其它不确定因素的影响, 制备砂样前对所要使用的粗颗粒和细颗粒预先进行了处理, 即烘干砂样后, 筛取粒径 0.075~0.250 mm 的颗粒为砂粒(图 1)。黏粒采用高岭土制备。试验所用砂的最大、最小干密度分别为  $1.62 \text{ g/cm}^3$  与  $1.30 \text{ g/cm}^3$ , 最大、最小孔隙比分别为 1.077 与 0.667。



图 1 砂样制备

试验前称取所需砂土, 煮沸冷却后加入所需黏粒, 浸泡后搅拌成浆, 用真空法排气。将混合浆分层装入捆扎好乳胶膜的对开模中, 扎紧试件上帽, 在负压下拆除对开模。

### 1.2 工况设计

本次试验共设计 5 种工况, 分别考虑粉粒含量、黏粒含量、初始相对密实度、固结应力、固结应力比对吹填粉细砂动强度的影响。

## 2 试验过程与破坏标准

### 2.1 试验过程

试样安装完毕后, 施加 20 kPa 的围压, 先通  $\text{CO}_2$  排出空气, 然后在一定高度的水头下, 自下而上通无气水 30 min, 反压饱和 120 min。饱和阶段结束, 进行  $B$  值检测,  $B$  值达到 0.95 以上认为土样达到饱和要求, 否则继续施加反压。试验所用设备见图 2。



图 2 动三轴试验设备

除不同固结应力比试验外, 所有试验均采用等压固结, 固结压力取 100 kPa。

### 2.2 破坏标准

土样破坏标准通常有应变标准、初始液化标准和极限平衡标准。砂类土的初始液化, 一般按 Seed 等所用的定义: 试样在循环荷载下, 应取振动孔隙水压力等于侧压为破坏标准, 即当动孔隙压力达到初始有效围压 ( $\Delta u/\sigma'_{3c} = 1$ ) 时, 则认为砂土液化<sup>[7]</sup>。工程经验表明, 粗颗粒较大或黏粒含量较少的试样易达到完全液化, 而粗颗粒较小或黏粒含量较大的土样, 即使试样已产生了足够的变形, 测得的动孔隙水压力也并不高<sup>[1]</sup>。针对此类情况, 可取全幅应变  $\varepsilon_f = 5\%$  为破坏界限<sup>[1, 8]</sup>。

本次试验中偏压固结采用变形标准 ( $\varepsilon_f = 5\%$ ), 等压固结采用孔压标准 ( $\Delta u/\sigma'_{3c} = 1$ )。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 粉粒含量影响

不同粉粒含量吹填粉细砂  $\sigma_d/(2\sigma'_0)-N_f$  曲线见图3。当粉粒含量由0增加到18%时, 吹填粉细砂动强度逐渐降低。破坏振次相同时, 粉粒含量为18%时的动强度为粉粒含量为0时的1/2。动强度在粉粒含量为6%~9%时降低幅度出现突变, 相同破坏振次下, 降低幅度约为22%。

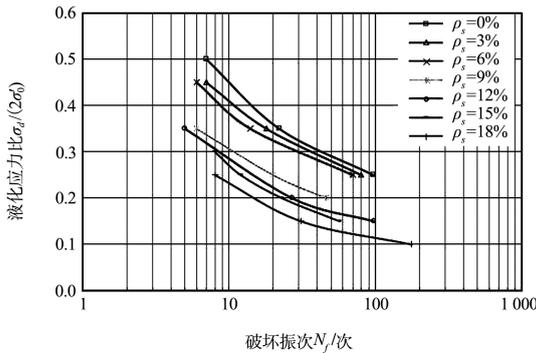


图3 不同粉粒含量吹填粉细砂  $\sigma_d/(2\sigma'_0)-N_f$  曲线

由试验结果可知, 粉粒含量对吹填粉细砂动强度影响较大, 砂土吹填时, 应尽量选择粉粒含量较少的砂源。粉粒含量若超过6%, 砂土抗液化能力明显降低, 后期地基土抗液化处理难度加大。

#### 3.2 黏粒含量

不同黏粒含量吹填粉细砂  $\sigma_d/(2\sigma'_0)-N_f$  曲线见图4。黏粒含量对吹填粉细砂液化性能有显著影响, 但抗液化强度并不是随着黏粒含量的增加而单调增加。破坏振次相同时, 黏粒含量9%与15%的吹填粉细砂抗液化强度相近。当黏粒含量小于12%时, 粉细砂抗液化强度随黏粒含量增加而降低。黏粒含量大于12%时, 抗液化强度随黏粒含量增加而增加。破坏振次相同时, 吹填粉细砂黏粒含量为12%时的动强度比黏粒含量为3%时降低约30%。

这是由于黏粒含量较少时, 黏粒主要起到润滑, 使得砂土的抗液化降低。当黏粒含量达到临界值时, 黏粒则表现为粘滞作用, 砂土逐渐向黏土过度, 因而抗液化能力又逐渐提高<sup>[7]</sup>。

砂土吹填时, 为减小地基抗液化处理难度, 提高地基土抗液化能力, 应尽量选择黏粒含量较低或较高的砂源, 尽量避免黏粒含量在临界值附近。

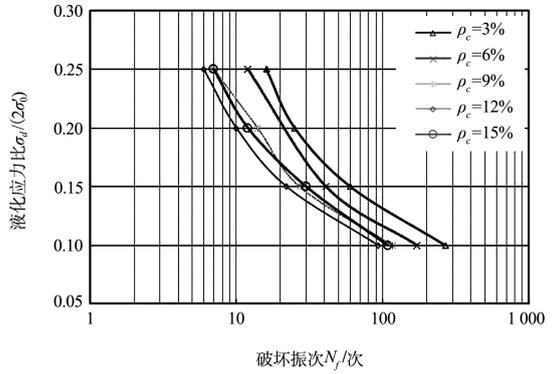


图4 不同黏粒含量吹填粉细砂  $\sigma_d/(2\sigma'_0)-N_f$  曲线

#### 3.3 初始相对密实度

不同初始相对密实度的吹填粉细砂  $\sigma_d/(2\sigma'_0)-N_f$  曲线见图5, 3组试验对应的初始相对密实度分别为52%、72%与92%。吹填粉细砂动强度随初始相对密实度增加而增加。

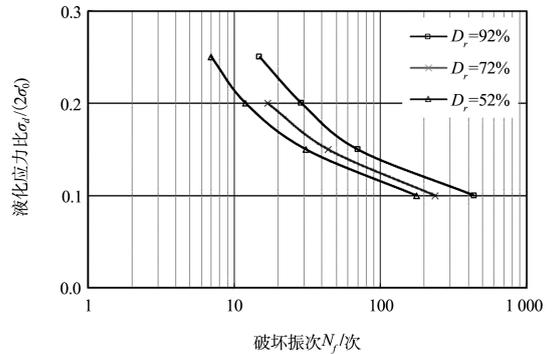


图5 不同初始相对密实度吹填粉细砂  $\sigma_d/(2\sigma'_0)-N_f$  曲线

初始相对密实度由52%增加到92%时, 相同破坏振次下, 吹填粉细砂动强度增加约25%, 可见初始相对密实度对吹填粉细砂动强度影响较小。这可能是因为不同初始相对密实度的吹填粉细砂, 经过等压固结后均有不同程度加密, 其振前相对密实度差别缩小引起的。

#### 3.4 固结应力

不同固结应力条件下, 吹填粉细砂  $\sigma_d/(2\sigma'_0)-N_f$  曲线见图6。固结应力小于200 kPa时, 吹填粉细砂动强度随固结应力的增加而增加; 当固结应力由200 kPa增加到300 kPa时, 吹填粉细砂动强度不再增加。

可见, 固结应力超过200 kPa时, 试样已接近最小孔隙比, 增加固结应力已不能增大试样密实度, 因此砂土的动强度也不再增加。

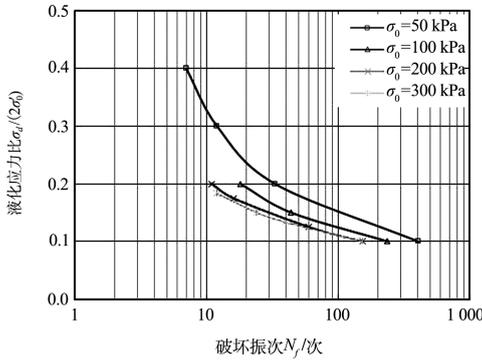


图6 不同固结应力吹填粉细砂  $\sigma_d / (2\sigma'_0) - N_f$  曲线

### 3.5 固结应力比

不同固结应力比条件下，吹填粉细砂  $\sigma_d / (2\sigma'_0) - N_f$  曲线见图7。由图7可见，吹填粉细砂动强度随固结应力比的增加而增加。

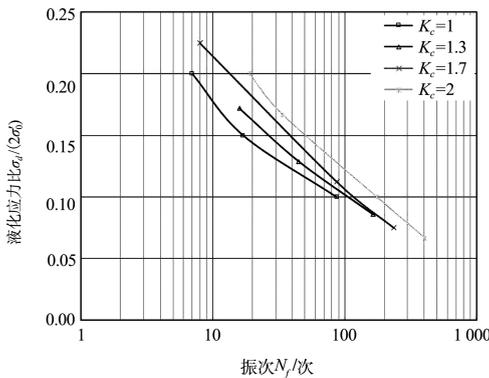


图7 不同固结应力比吹填粉细砂  $\sigma_d / (2\sigma'_0) - N_f$  曲线

根据相关研究成果，砂土动强度并非随固结比单调增加，其临界值为

$$k_c = (1 + \sin\varphi^0) / (1 - \sin\varphi^0) \quad (1)$$

式中： $\varphi^0$  为初始剪胀角。这是因为在固结比增加的初期阶段，一定的初始剪应力使得砂土很快进入剪胀阶段，此时，砂土的孔隙压力相对比较小，并且逐步趋于稳定，这使得砂土有效应力水平稳定在安全值的附近，该稳定值随着固结比的增大而减少，且应变增幅不大；但当固结比大于某一值后，较大的初始剪应力使得砂土很快达到极限平衡状态，多次达到极限平衡后，砂土出现大幅度的应变，直到砂土破坏<sup>[5]</sup>。

### 4 结语

1) 吹填粉细砂动强度随粉粒含量增加而降低。

动强度在粉粒含量为6%~9%时降低幅度出现突变，砂土吹填时，应尽量控制粉粒含量在6%以内。

2) 吹填粉细砂抗液化强度并非随着黏粒含量的增加而单调增加，当黏粒含量为12%时，抗液化强度最低。砂土吹填时，尽量避免黏粒含量在临界值附近。

3) 初始相对密实度对吹填粉细砂动强度影响较小。这可能是因为试样经过等压固结后均有不同程度的加密、其振前相对密实度差别缩小引起的。

4) 固结应力小于200 kPa时，吹填粉细砂动强度随固结应力的增加而增加；大于200 kPa时，试样已接近最小孔隙比，增加固结应力已不能增大试样密实度，动强度不再增加。

5) 当固结比小于2时，吹填粉细砂动强度随固结应力比的增加而增加。根据相关研究成果，砂土动强度并非随固结比单调增加。进一步研究时可增加固结比，测得临界值。

### 参考文献:

- [1] Chung K Y C, Wong I H. Liquefaction potential of soils with plastic fines [C]// Soil Dynamics and Engineering Conference, Southampton: [ s.n. ]. 1982: 887-897.
- [2] 吴建平, 吴世明. 动荷载下含黏粒砂土的特性[C]// 中国水利学会岩土力学专业委员会. 全国土工建筑物及地基抗震学术讨论会论文汇编, 1986: 265-268.
- [3] 范菊菊. 夯后轻亚黏土抗液化性能的试验研究[D]. 太原: 太原工业大学, 1988.
- [4] Oiu Y H, Fan S J, Fan W Y. Some aspects on the Liquefaction potential of dynamicity compacted loesslike sandy loam [C]// International Association for Earthquake Engineering. Proc of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, 1988: 225-230.
- [5] 王星华, 周海林. 固结比对饱和砂土液化的影响研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(6): 265-268.
- [6] 刘雪珠, 陈国兴. 黏粒含量对南京粉细砂液化影响的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 22(3): 150-155.
- [7] 衡朝阳, 何满潮, 裘以惠. 含黏粒砂土抗液化性能的试验研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 339-344.
- [8] 徐刚, 潘恕, 姬美秀, 等. 粗粒土动强度试验成果的分析方法[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 63-66.