



# 细粒含量对强夯加固粉细砂效果的影响

张璟泓，周红星，王婧，梁小丛，梅涛涛

(中交四航工程研究院有限公司，中交交通基础工程环保与安全重点实验室，广东 广州 510230)

**摘要：**使用强夯法处理粉细砂地基时，粉细砂中的细粒含量会对强夯法的加固效果产生较大影响。针对粉细砂中细粒含量对强夯效果影响的问题，对强夯法加固不同细粒含量粉细砂的适用性进行研究，采用室内模型试验的方法，得出细粒含量对强夯夯沉量、超静孔隙水压力及加固效果的影响，并提出相应的现场施工建议。结果表明：细粒含量对强夯加固均质粉细砂的效果存在较大影响；10%细粒含量为转折点，当细粒含量大于10%后，细粒含量越高，强夯法适用性越低。

**关键词：**强夯法；模型试验；粉细砂；细粒含量

中图分类号：U 655.54

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)09-0194-07

## Effect of fine content on consolidation of silty fine sand by dynamic compaction

ZHANG Jing-hong, ZHOU Hong-xing, WANG Jing, LIANG Xiao-cong, MEI Tao-tao

(CCCC Key Lab of Environmental Protection and Safety in Foundation Engineering of Transportation,

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

**Abstract:** The fine content of fine sand will have a great impact on the reinforcement effect of the dynamic compaction method when treating the silty fine sand foundation by the dynamic compaction method. Aiming at the problem of the influence of fine content in silty fine sand on dynamic compaction reinforcement effect, we study the applicability of dynamic compaction method with different fine content of silty sand, obtain the influence of fine particle content on dynamic compaction settlement, excess pore water pressure and reinforcement effect by the model test in the laboratory, and put forward the corresponding construction suggestions. The results show that the fine content has much influence on the effect of dynamic consolidation of homogeneous silty fine sand. Ten percent of the fine particle content is the turning point. When the content of fine particles is more than 10%, the higher the content of fine particles is, the lower the applicability of the dynamic compaction method is.

**Keywords:** dynamic compaction; model test; silty fine; fine content

强夯法又称动力固结法，这种方法是反复将夯锤提到高处使其自由落下，将地基土夯实，从而提高地基的承载力，降低其压缩性，改善地基性能。关于强夯法的适用范围，《中国水运工程地基设计规范》<sup>[1]</sup>规定：强夯法适用于松软的碎石土、砂土、低饱和度的粉土和黏性土、素填土和杂填土。但是针对强夯法处理粉细砂地基的情况，工程应用中仍存在以下问题：粉细砂中的细粒(粒径小于0.075 mm的土颗粒)会对强夯的效果造成

较大影响，国内外相关规范中并未明确给出强夯法处理粉细砂时所适宜的细粒含量界限，细粒含量对强夯加固效果的影响目前仅凭经验进行判断。

通过收集相关工程案例并结合中交四航工程研究院有限公司在近年来参与的海外地基处理工程，不同工程对细粒含量要求见表1。设计规格书中对于细粒含量的要求为5%~20%，存在一定的差异，这使得工程质量控制上存在不确定性，需要研究粉细砂中细粒含量对强夯适用性的影响情况。

表1 不同工程对细粒含量的要求

工程名称	地基砂细粒含量/%	规格书中对细粒含量的要求/%
多哈某港口工程	7~38	<15
沙特吉赞某工程	6~45	≤10
纳米比亚某港口工程	0~21	≤5
喀麦隆某港口工程	0~20	≤20
安哥拉某港口工程	约10	≤20
西非某港口工程 <sup>[2]</sup>	0~15	<15
上海某港口工程 <sup>[3]</sup>	-	<15

目前, 强夯法在粉细砂地基中的加固效果已有较多的研究, 众多研究者对强夯法处理粉细砂地基的效果做出分析评价, 如林雄斌<sup>[4]</sup>通过现场试验的方法得出基本不含细粒的细砂能够通过强夯加固取得较好的加固效果; 周建等<sup>[5]</sup>通过现场试验得出采用真空降水联合强夯的施工方法可以有效加固粉细砂地基; 刘岩等<sup>[6]</sup>通过现场试验的方法得出粉细砂中的细粒含量对振冲及强夯法加固存在较大的影响。

本文采用模型试验的方法, 基于前人提出的“逐级加载”的施工方法<sup>[7~8]</sup>, 对不同细粒含量的粉细砂进行强夯法适用性研究, 详细分析细粒含量对强夯夯沉量、超静孔隙水压力及静力触探试验结果的影响, 提出均质粉细砂采用强夯法处理时的细粒含量转折点, 为后续研究及相关工程提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 模型相似关系

为使模型试验结果能再现原型体系的特性, 准确反映工程实际效果和机制, 根据相似原理和量纲分析设计模型的相似系数  $C$ <sup>[9]</sup>。本次模型试验中影响加固深度  $H$  的主要参数有夯击能  $E$ 、夯锤质量  $W$ 、夯锤落距  $h$ 、夯锤直径  $D$ 、夯击次数  $N$ 、土的密度  $\rho_d$  及含水率  $\omega$ 。建立方程  $f$  如下:

$$f(E, W, h, D, N, \rho_d, \omega, H) = 0 \quad (1)$$

其中的  $W$ 、 $h$ 、 $N$  为相互独立的物理量, 根据  $\pi$  定理<sup>[10]</sup>, 采用量纲分析法, 求出各无量纲群为:

$$\left( \frac{E}{Wh}, W, h, \frac{D}{h}, N, \frac{\rho_d h^3}{W}, \omega, \frac{H}{h} \right) = 0 \quad (2)$$

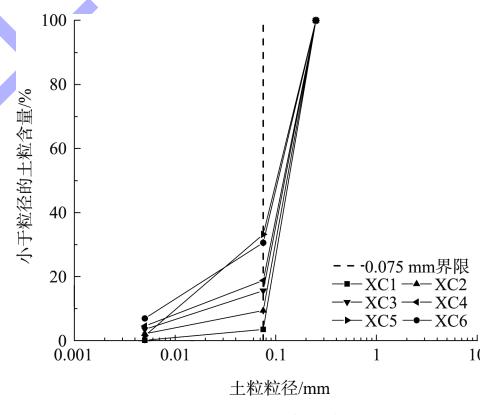
可得各参数相似系数关系为:  $\frac{C_E}{C_W C_h} = 1$ 、 $\frac{C_D}{C_h} = 1$ 、

$$\frac{C_{\rho_d} C_h^3}{C_W} = 1, C_\omega = 1, \frac{C_H}{C_h} = 1$$

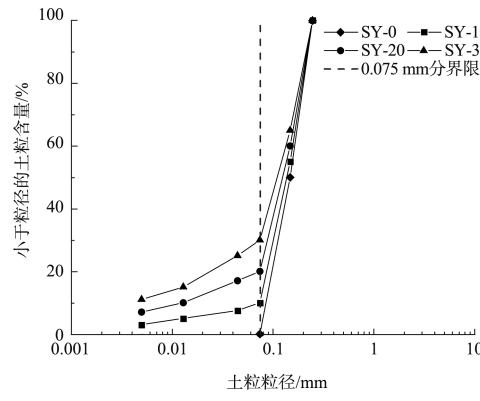
根据试验条件确定落距相似系数  $C_h = 20$ , 锤质量相似系数  $C_W = 8000$ , 其他参数相似系数  $C_E = 160000$ 、 $C_D = 20$ 、 $C_N = 1$ 、 $C_H = 20$ 、 $C_{\rho_d} = 1$ 、 $C_\omega = 1$

### 1.2 试验土样

参考所依托的沙特吉赞某工程现场粉细砂的情况, 选择石英砂 ( $0.075 \sim 0.5$  mm) 作为粗颗粒, 石英粉 ( $< 0.075$  mm) 作为细颗粒, 通过级配拟合, 配置 0%、10%、20% 及 30% 细粒含量的重塑砂样, 重塑砂样的级配曲线 (图 1), 现场土样 (XC) 与重塑砂样 (SY) 的基本参数见表 2。



a) 工程现场土样



b) 重塑砂样

图1 工程现场土样和重塑砂样的级配曲线

表 2 土样基本参数

土样编号	细粒含量/%	类别	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )		渗透系数(10 <sup>-4</sup> cm/s)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	塑性指数
			最大值	最小值				
XC2	9.4	细砂	1.82	1.31	54.40	1.0	28.6	4.6
XC4	18.8	粉砂	1.89	1.30	12.30	1.5	28.3	5.9
XC6	30.6	粉砂	1.95	1.26	9.51	2.2	27.9	6.9
SY-0	0	细砂	1.69	1.40	78.20	0.3	29.5	1.2
SY-10	10.0	细砂	1.80	1.27	28.10	1.1	29.1	3.4
SY-20	20.0	粉砂	1.85	1.20	9.07	1.8	28.2	5.5
SY-30	30.0	粉砂	1.89	1.15	8.11	2.6	28.0	6.5

### 1.3 试验方案

由于工程现场粉细砂相对密实度较低, 表层较为软弱, 直接采用高能级夯击会导致沉锤等问题。结合文献资料, 本次试验遵循“先轻后重、少次多遍”的原则进行。对 SY-0、SY-10、SY-20、SY-30 等 4 种试验土体先后进行低、中、高 3 种能级的单点夯试验, 不同夯击能具体试验参数见表 3。

表 3 模型试验夯击能参数

能级	原型夯击能/(MN·m)	模型夯击能/(N·m)	夯锤底面直径/cm	夯锤质量/kg	夯锤落距/cm
低能级	1	6.25	12.5	2.50	25
中能级	3	18.75	12.5	2.50	75
高能级	6	37.50	12.5	3.75	100

### 1.4 试验装置及仪器布置

为模拟强夯法的施工过程, 本模型试验系统由模型试验装置、控制系统、微型孔隙水压力计、数据采集仪、激光测距仪、室内微型静力触探仪、进出水装置及计算机数据分析系统组成。试验模型装置由可移动平台、电动导轨、电磁铁及夯锤组成。控制系统可以通过编程控制电动导轨的移动和电磁铁的开关精确控制夯击过程。整套试验系统如图 2 所示。

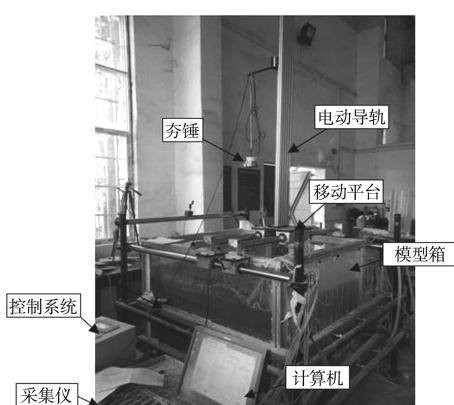


图 2 试验装置

根据实际施工参数, 按照表 1 所确定的各参数进行模型尺寸和试验设计。试验中采用了两种质量的夯锤, 分别为 2.50 及 3.75 kg, 底面直径均为 12.5 cm。模型箱由铝合金骨架及钢化玻璃制成, 尺寸为 1.4 m×1.2 m×1.2 m(长×宽×高)。

微型孔隙水压力计与夯点中心间距为 10 cm, 纵向每 15 cm 布置一个探头, 埋深为 15~75 cm, 具体布置如图 3 所示。每种夯击能夯击完成后对夯点中心进行静力触探试验。

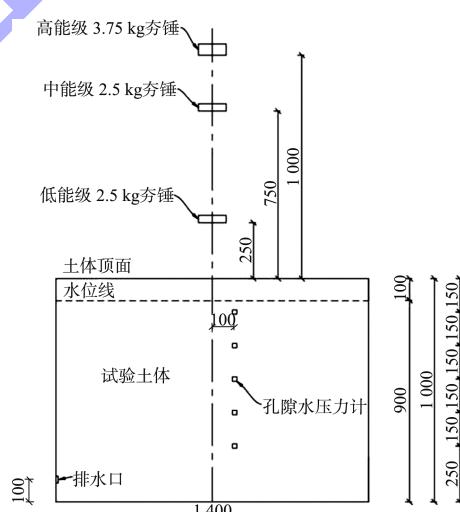


图 3 仪器布置 (单位: mm)

### 1.5 试验步骤

- 1) 采用雨落法分层铺设土样, 通过计算及称质量控制每层试验土体相对密实度  $D_r = 0.3$ 。
- 2) 铺设土体至传感器埋设高程后, 通过进出水装置从底部缓慢向模型箱内部加水, 待水完全漫过试验土体后, 埋设微型孔隙水压力计, 保证其全程不接触空气。
- 3) 铺设完成全部 100 cm 厚土体后, 控制模型

箱内水位为 90 cm, 静置 3 d 保证其完全稳定。

4) 遵循“先轻后重、少次多遍”的原则对试验土体进行 3 种不同夯击能的单点夯击。每种夯击能夯击 8 次, 每次夯击间隔 5 min, 每次夯击完成后测量夯沉量。夯击时, 实时测量土体不同位置的孔隙水压力。

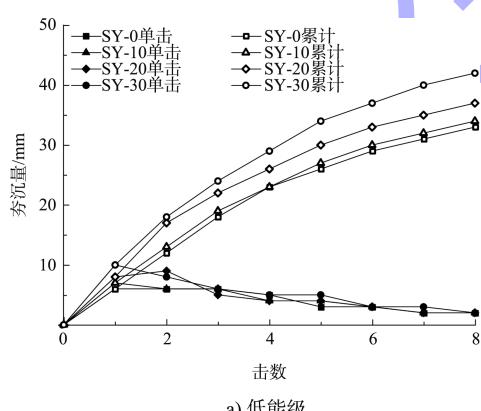
5) 每种能级夯击完成后静置 1 d, 待其超静孔隙水压力完全消散后, 进行室内静力触探试验。

6) 完成室内静力触探试验后, 填平夯坑及静力触探孔, 静置 1 d, 确保孔隙水压力完全稳定后, 进行下一能级的夯击。

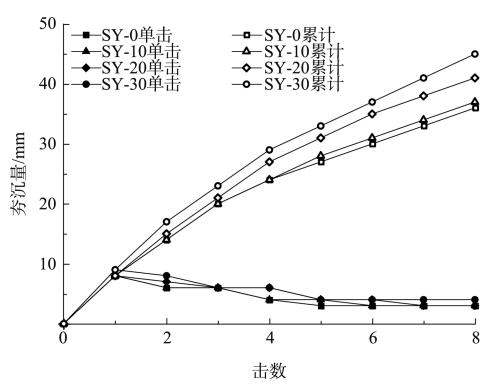
## 2 试验结果

### 2.1 夯沉量分析

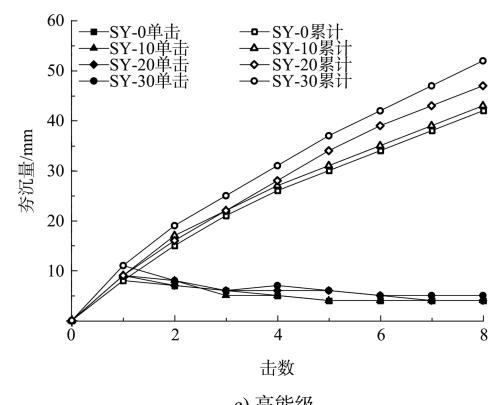
强夯过程中土体因为夯击而产生的沉降量被称作夯沉量。因其测量方便且能直观反映夯击效果, 在工程实际中经常通过控制夯沉量控制施工效果。通过对强夯夯沉量进行分析, 能够很好地得出强夯夯击时土体的变形情况。试验夯沉量结果如图 4、5 所示。



a) 低能级



b) 中能级



c) 高能级

图 4 夯沉量对比

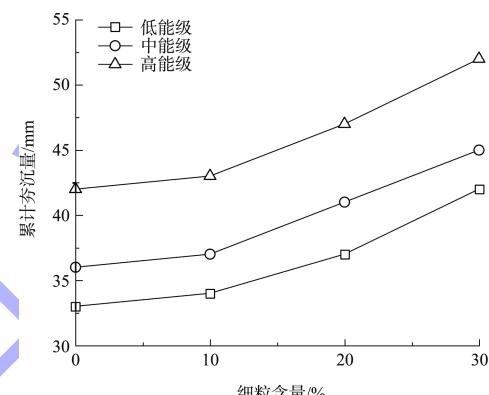


图 5 细粒含量对累计夯沉量的影响对比

对比各试验土体的单击夯沉量可知, 单击夯沉量可以分为 2 个不同的阶段: 第 1 阶段为强夯坑底部夯实体的形成阶段, 单击夯沉量随着夯击进行而迅速减小, 强夯坑底部土体密实度大幅增加; 第 2 阶段为强夯坑底部夯实体成长的末期阶段, 单击夯沉量随夯击不再减小而是稳定于一个较小值。通过对比可以发现, 细粒含量主要改变单点夯击时完成第 1 阶段所需的击数。随着细粒含量的增加, 试验土体完成第 1 阶段、达到第 2 阶段的所需击数增加。

对比各试验土体的累计夯沉量可知: 1) 随着细粒含量的增加, 相同夯击能下试验土体的累计夯沉量呈现非线性增大。当细粒含量从 0 增加到 10% 时, 累计夯沉量略微增大, 当细粒含量从 10% 增加到 30% 时, 累计夯沉量基本呈线性增大, 10% 细粒含量转折点。2) 随着夯击能级的增加, 累计夯沉量逐渐增大, 土体夯击变形随着夯击能级增加而增加, 能级的提升能够在一定程度上提

升加固效果。

## 2.2 超静孔隙水压力分析

### 2.2.1 超静孔隙水压力随夯击次数变化

选取距离夯点最近的孔隙水压力计(距离夯点中心 10 cm, 埋深 15 cm)为试验孔压计, 分析各试验土体在夯击时产生的超静孔隙水压力, 结果如图 6 所示。

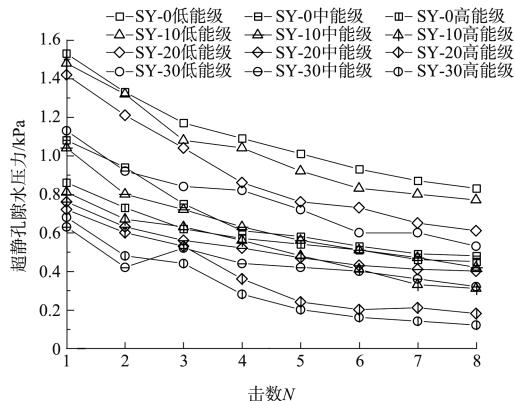


图 6 超静孔隙水压力随夯击变化

由图 6 可知, 试验在夯第 1 击时就已经产生较大的超静孔隙水压力, 随着击数增加, 夯击产生的超静孔隙水压力逐步减小, 最后基本趋于稳定, 这主要是因为随着夯击的进行, 土体被加固, 相对密实度增加, 渗透系数减小。结合之前关于夯沉量的分析可以得出: 含细粒粉细砂在强夯第 1 击时就基本决定了超孔压强度及孔压影响范围。

### 2.2.2 细粒含量对超静孔隙水压力的影响

选取  $N=1$  时, 不同试验土体代表孔压计(距离夯点中心 10 cm, 埋深 15 cm)处超静孔隙水压力进行对比, 如图 7 所示。

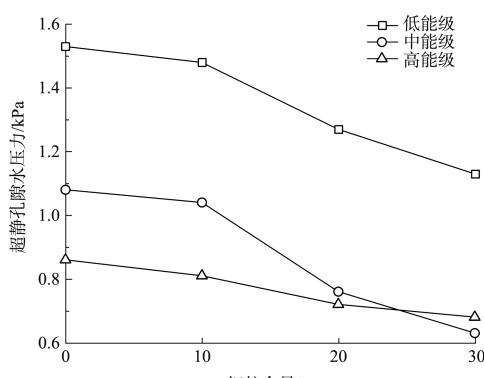


图 7 超静孔隙水压力随细粒含量变化

由图 7 可知, 随着细粒含量的增加, 试验土体在夯击时产生的超静孔隙水压力逐渐减小, 细粒含量对超静孔隙水压的影响分为 2 个阶段: 当细粒含量从 0% 增加至 10% 时, 超静孔隙水压力的减少较小; 当细粒含量从 10% 增加到 30% 时, 孔隙水压力迅速减小。10% 细粒含量为转折点。对比不同能级所产生的超静孔隙水压力可以发现, 随着能级的增加, 该点处的超静孔隙水压力减少, 主要原因有: 1) 本次试验采用“先轻后重”叠加夯击的方法, 土体已被前一能级加固, 该点处的相对密实度提高, 渗透系数下降, 进而导致超静孔隙水压力降低; 2) 夯击能越大, 主要作用区域的深度越深, 能量向下传递, 该点处产生的超静孔隙水压力较小。

### 2.2.3 超静孔隙水压力随深度的变化

选取  $N=1$  时不同位置超静孔隙水压力值进行对比分析, 如图 8 所示, 可以得出强夯产生的超静孔隙水压力随深度的变化。

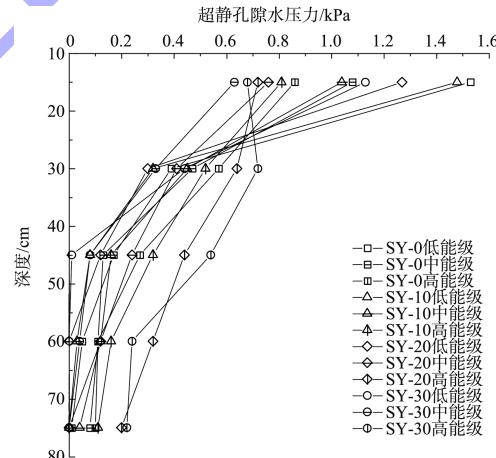


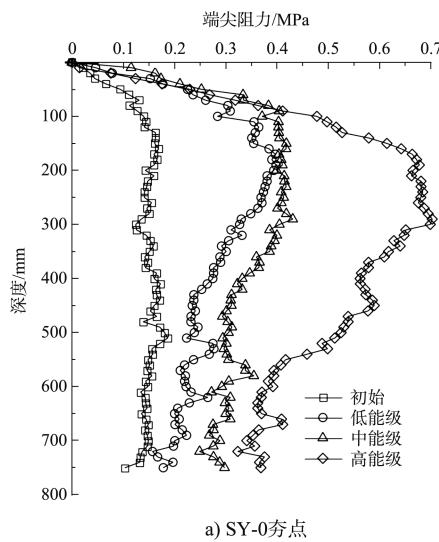
图 8 超静孔隙水压力随深度变化

由图 8 可知, 在不同能级下, 细粒含量对强夯的加固产生的超静孔压影响不同。低能级时, 随着细粒含量的增加, 强夯在不同深度处产生的超静孔隙水压力减少。但在高能级时, 埋深 30 cm 及以下位置的超静孔隙水压力随细粒含量的增加而增加, 这主要是因为该深度低细粒含量的试验土体已在前一能级得到较好的加固, 土体密实度较高, 应变较小。超静孔隙水压力在高能级夯击时的提升, 可以证明采用“先轻后重、少击多遍”的施工方法时, 后续高能级的强夯能够较好地加

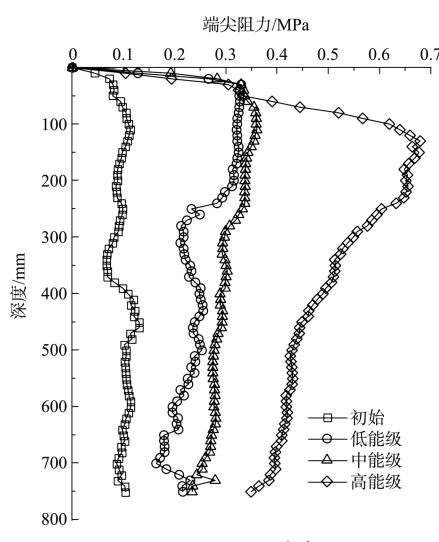
固土体深层。

### 2.3 静力触探结果分析

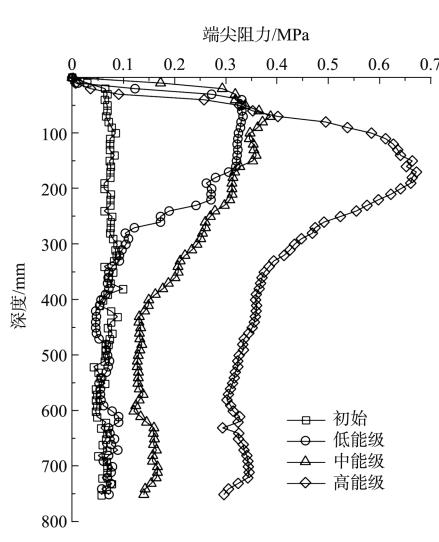
不同试验土体夯点处静力触探结果如图9所示。



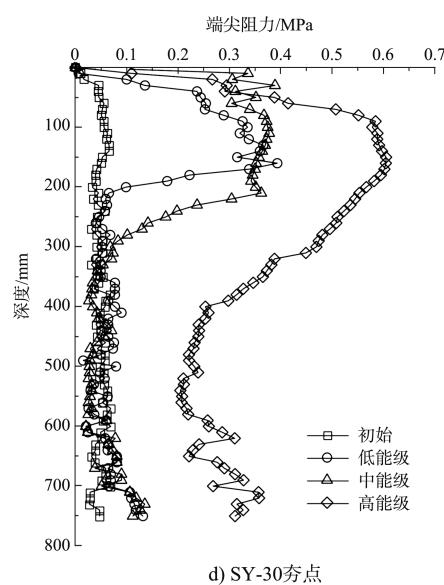
a) SY-0夯点



b) SY-10夯点



c) SY-20夯点



d) SY-30夯点

图9 不同试验土体夯点处静力触探结果对比

由图9可知,当细粒含量从0%增加到10%时,强夯加固后的效果基本相同,当细粒含量从10%增加到30%时,土体在强夯后所能达到的加固效果越差,土体所能达到静力触探端尖阻力最大值越小,土体有效加固的深度越小。因此,10%细粒含量为粉细砂采用强夯法加固的转折点,实际工程中,当细粒含量大于10%时,应对土体进行相关试验确定其强夯法的适用性及施工方法和参数。另外,粉细砂在受到强夯加固时有一个界限夯击能,若作用夯击能小于界限夯击能,土体受到夯击时的加固效果较差,加固范围随着夯击能的提升较小,底部夯实体的强度存在一个阈值。当作用夯击能超过界限夯击能时,强夯对试验土体的加固效果大幅提升,底部夯实体的强度突破阈值且明显大于之前的夯实体强度。对于本试验,试验组在低、中能级强夯作用下,底部夯实体的静力触探最大端尖阻力仅能达到0.4 MPa,而使用高能级强夯后,可以突破这个界限,达到0.6 MPa以上。

### 3 结论

1) 细粒含量对强夯加固均质粉细砂地基存在较大的影响,其中细粒含量10%为转折点。当细粒含量为0%~10%时,细粒影响较小;当细粒含

量大于 10% 后，细粒的影响逐渐增大，细粒含量越高，强夯处理效果越差，强夯法的适用性越低。

2) 采用强夯法加固粉细砂地基时，可以采用“先轻后重、少击多遍”的施工方法。低能级夯击能够作用在土体浅层，使原来较为软弱的粉细砂表层形成一层持力层，避免沉锤等施工问题，再使用高能级夯击提升地基土深层的强度。

3) 强夯加固粉细砂时可能存在一个界限夯击能，使用界限夯击能以下的能量夯击时(对应低、中能级)，夯击的加固效果有限，加固效果较差；使用高于界限夯击能的能量加固时(对应高能级)，夯击加固效果较好。

## 参考文献：

- [1] 中交天津港湾工程研究院有限公司.中国水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] 王彭生, 熊建波, 陈明杰, 等. 基于统计分析的吹填材料

(上接第 181 页)

表 3 每延米压膜沟工程效益对比

工艺	压膜沟开挖 土方量/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-1</sup> )	开挖压膜沟所需 工时/(时·m <sup>-1</sup> )	费用/ 元·m <sup>-1</sup> )
传统工艺(挖机开挖)	32.2	3.0	225.4
本文工艺(人工开挖)	1.0	0.2	7.0

## 4 结论

1) 若能保证整个软基处理场区与外界严格密封，在真空泵数量足够的前提下，场区内部各分区之间即便互相通气对真空预压处理效果也将无影响。

2) 加固区面积大、透气土夹层厚度大、埋深大时，加固区外边界使用黏土密封墙密封；加固区内部各分区之间的压膜沟采用人工浅挖，并将相邻分区密封膜在压膜沟处错层交互粘接后用砂袋压固。该工艺可减少开挖工作量、缩短工期、节约成本。

粒径分布对强夯地基处理效果影响[J].建筑科学, 2020, 36(S1): 204-210.

- [3] 傅瑜, 徐梅坤, 陆荣平, 等. 洋山深水港区芦潮港地区粉细砂强夯试验研究[J]. 水运工程, 2006(1): 83-87.
- [4] 林雄斌. 强夯法加固地基机理分析与强夯吹填砂性地基试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [5] 周健, 崔积弘, 贾敏才, 等. 吹填细砂软弱地基处理试验研究[J]. 岩土力学, 2008(4): 859-864.
- [6] 刘岩, 贺迎喜, 杨和平. 强夯与无填料振动法处理松散细砂地基对比试验[J]. 中外公路, 2015, 35(6): 33-36.
- [7] 郑颖人, 陆新, 李学志, 等. 强夯加固软粘土地基的理论与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000(1): 21-25.
- [8] 周凯敏, 周健, 贾敏才. 低能量强夯法加固浅层吹填土地基试验研究[J]. 施工技术, 2009, 38(9): 98-100.
- [9] 熊巨华, 胡斌, 冯世进, 等. 强夯法加固粉土地基室内模型试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(S1): 241-246.
- [10] 徐挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982.

(本文编辑 王璁)

## 参考文献：

- [1] 岳建文. 大面积真空预压边界密封技术的应用[J]. 水运工程, 2012(3): 129-132.
- [2] 严红霞, 韩文君, 孙信, 等. 真空预压技术加固夹砂软土地基试验[J]. 林业工程学报, 2019, 4(5): 140-145.
- [3] 李明东, 潘耀森, 郎钞棚, 等. 真空预压法处理吹填超软地基 10a 进展及展望[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(1): 15-22.
- [4] 高志义, 冯军. 边界问题及其对真空预压的影响[J]. 岩土工程技术, 2014, 28(5): 250-256.
- [5] 高志义. 真空预压法的理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [6] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 中国水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [7] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013.

(本文编辑 武亚庆)