

6-11, 25

# 粘性土为主的地基强夯的时效性

TU 447

王宏太

陈嘉福

(上海港湾工程设计研究院 上海 200032) (厦门港务局 厦门 361000)

**摘要** 根据浦东国际机场飞行区跑道地基强夯工程(三标)实测的不同时间的静力触探资料,讨论以粘性土为主的地基强夯强度增长的时效现象,得出:粘性土为主的地基,强夯的加固作用具有滞后特性。

**关键词** 粘性土为主的地基 强夯 硬壳层 时效性

软土地基

## 1 前言

用强夯法来加固软土地基,已经越来越受到重视。它设备简单,原理直观,经济效益明显,适用范围广泛。可用于加固各种填土,包括碎石土,砂土,一般性粘土,以及工业、建筑垃圾等。

在砂性土层中强夯,一般情况下不需要添加粗砾状的置换层。随着强夯结束,地基土的强度和变形等指标变化也已基本完成。对粘性土为主的地基,大多数情况下需要添加粗砾状的置换层,如钢渣,碎石,山皮石等。因此,强夯形成了由粗砾料与粘性土混合而成的硬壳层。硬壳层的好坏,直接关系到强夯的成败。许多文献报道的失败事例,我们分析认为,主要原因是没有形成良好的硬壳层。

在大量的工程实践中,以粘性土为主的地基表层常形成硬壳层,地基土的加固作用有明显的“滞后”现象。探讨这种硬壳层的时效性可以进一步了解强夯加固地基的作用、性能,更正确地评估强夯加固效果。本文主要以浦东国际机场飞行区跑道地基强夯工程实测的不同时间的静力触探资料为据,讨论以粘性土为主的地基强夯的时效性。

## 2 地基土强夯强度增长过程

强夯加固地基有两种理论:动力压密和动力固结。动力压密适用于砾石、粗粒杂填土、砂土等;动力固结适用于粘性土。

根据 Menard 的动力固结理论,粘性土在强夯时,可分为四大阶段:

(1) 饱和土的压缩

土中总存在一些微小气泡,土颗粒之间的孔隙可压缩,其体积占整个体积的 1—3%,最多可达 4%。施行强夯时,气体体积压缩,孔隙水压力增大(产生超孔隙水压力)。随后气体有所膨胀,如图 1 中的(A),孔隙水排出,孔隙水压力减少,固相体积始终不变。这样每夯击一遍,液相体积就有所减少,气相体积也有所减少,(每夯一遍减少 40%,夯五遍之后,气体体积仅是原来气体体积的 8%左右)。

在冲击力作用下,含有空气的孔隙水不能立即消散而具有滞后现象。气体的体积也不能立即膨胀。土颗粒周围的吸着水,由于振动或温度上升而变作自由水。其结果使土颗粒之间的内聚力削弱,土强度降低。

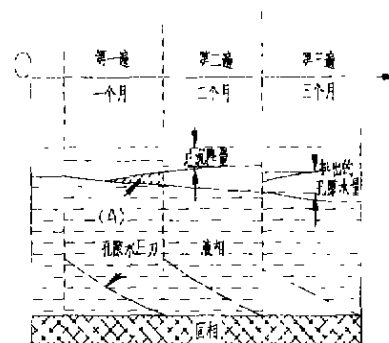


图 1 施行强夯时气相、液相的变化情况

(2) 土体液化/触变

土体沉降与夯击能成正比,当夯击能达到一

收稿日期:1999-01-26

第一作者简介:王宏太,男,高级工程师,1963年生,1985年毕业于南京大学地质系,水文地质工程地质专业。

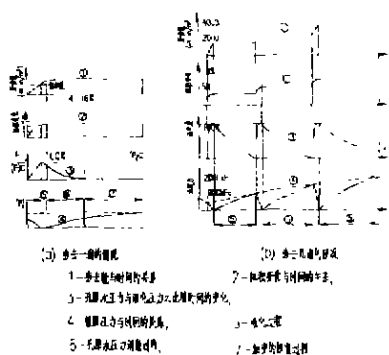


图2 施行强夯时土体的变化情况

定程度时,即当气体的体积百分比接近于零时,土具有不可压缩性,此界限值称为饱和能,如图2。饱和能的大小与土的种类有关,一般为 500~2000kN·m/m<sup>2</sup>。

夯击能达到饱和能时,土体产生液化或触变,吸着水变成了自由水,土的强度下降到最小值。一旦达到饱和能量的瞬间,就不能再多夯,否则土体固结条件遭到破坏,孔隙水反而不易排出,土体强度降低后将难以恢复。

(3) 渗透性增大

当夯击能增大到饱和能时,孔隙水压力上升到与竖向应力相等(即  $\mu = \sigma$ , 而  $\tau_c = (\sigma - \mu) \tan \phi = 0$ ),夯击停止后,孔隙水压力迅速消散。如果仍使用夯击前土的渗透系数,就无法解释孔隙水压力何以能如此迅速消散。所以 Menard 认为,在很大的夯击能作用下,土中出现很大的应力和冲击波,致使地基内部出现裂隙形成树枝状排水网络。

强夯时土体局部液化,即这一瞬间的孔隙水压等于总压力所产生的超孔隙水压力,使土颗粒之间出现裂隙,形成排水通道,土的渗透系数陡

增。当孔隙水压力消散,达到小于土颗粒之间的横向压力时,裂隙闭合,土中水的运动又恢复常态。

(4) 触变的恢复

从试验及施工中可知,在夯击进行中土的抗剪强度明显地降低,当土体液化或接近液化时,抗剪强度为零或最小,吸附水变成自由水。当孔隙水压力消散,土的抗剪强度和变形模量大幅度地增长,土体颗粒间的接触更加紧密,新的吸附水层逐渐固定,这是由于自由水重新被土颗粒所吸附变成了吸着水的缘故。这就是具有触变性的土的特性、触变性土与土质种类有很大关系,有的恢复得快,有的恢复得非常缓慢。

3 软土地基强夯的时效性

有大量的工程实例证明上述 Menard 的动力固结理论四大基本特点与工程实际基本吻合,强夯结束后,地基土的强度仍有增加。由于工程工期、测试手段等方面的限制,以粘性土为主的地基强夯后,强度增长时效性的实测资料并不多。一般情况下,竣工验收往往很快进行,而此时的地基强度、变形等并不是强夯的最终效果。认识到粘性土地基强夯的时效性,可以对强夯加固后地基最终效果有充分的认识。下面结合浦东国际机场三标段强夯试夯区历时近一年的静力触探实测资料,讨论强夯的时效性。

3.1 浦东国际机场飞行区跑道地基强夯处理三标段强夯试夯区位于川沙江镇与南汇祝桥境内,机场外侧是东海,如图3所示;试夯小区的地质资料如表1所示。从表1中可看出,该场地是以粘性土为主。

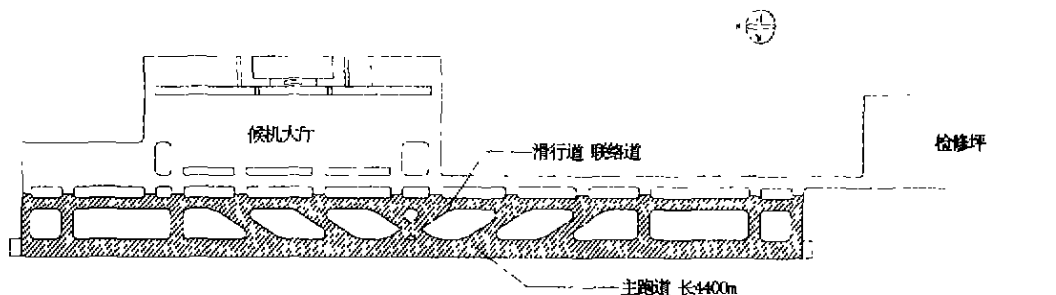


图3 浦东机场飞行区跑道

3.2 试夯小区的施工过程是:推耕植土→铺 80cm 宝钢钢渣→第一遍点夯→第二遍点夯→普夯→找平。夯击能为 1500(2000)kN·m × 3.5m(4.0m),普夯能量为:600kN×m,搭接普夯。

3.3 围绕上述施工过程,在强夯前后分别做了静力触探试验,前后历时近一年。这次采用的进口静

探设备,可以直接穿过钢渣层,无需预先开孔,从而比较准确地获得了钢渣与土的混合层,以及其下卧土层的静探资料。在强夯结束工程验收以后,小区的场地一直处于自然暴露状态,几乎没有干扰,直至道面工程开工。经过整理,主要阶段各土层的静探资料如表 2 所示。

强夯过程中的静力触探比贯入阻力变化曲线

表 1 土的物理力学性质表

土层编号	土层名称	含水量 w(%)	密度 ρ (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙比 e	固结直剪		渗透系数	
					内聚力 c(kPa)	内摩擦角 Φ(度)	水平 kh (10 <sup>-6</sup> cm/s)	垂直 kv (10 <sup>-6</sup> cm/s)
1	填土							
2-1	褐黄色粉质粘土	27.1~34.1 30.8	1.85~1.95 1.9	0.78~0.99 0.88	20~27 24	20.0~28.0 22.4	2.19~4.09 2.83	1.21~2.81 1.91
2-2	灰黄色粉质粘土	30.6~45.8	1.75~1.90	0.88~1.27	16~20	14.5~21.5	3.57~6.34	3.75~5.41
2-3	灰色粉质粘土 砂质粉土 (夹粉砂)	25.3~35.4 30.8	1.75~1.90 1.9	0.73~0.98 0.86	2~10 6	24.5~35.5 30.7	31.4~581.0 333.0	30.6~625.0 248.0
3	灰色淤泥质粉质粘土	36.4~49.1 41.8	1.73~1.85 1.79	1.01~1.35 1.16	12~16 14	15.5~19.5 17.2	2.10~4.72 3.22	1.14~3.38 2.35

表 2 浦东国际机场静探值增长表

地层名称	埋深 (m)	类别	强夯前		强夯完成后							
			96-9-26	7天				175天		362天		
				96-11-20	本次增长率%	总增长率%	97-5-14	本次增长率%	总增长率%	97-9-23	本次增长率%	总增长率%
钢渣与褐黄色粉质粘土混合层	0~1.85	P <sub>s</sub> (MPa)	1.58	9.640	510.9	510.9				16.841	74.7	967.1
淤泥质粉质粘土	1.85~2.55		0.53	0.902	69.2	69.2	0.99781	10.6	87.0	1.617	62.1	203.2
粉质粘土	2.55~3.70		1.06	2.048	92.5	92.5	2.22745	8.7	109.3	2.321	4.2	118.1
砂质粉土夹粉质粘土	3.70~8.35		4.27	5.100	19.5	19.5				5.631	10.4	31.9
淤泥质粘土	8.35~10.0		0.68	0.675	-0.2	-0.2				0.692	2.6	2.5
钢渣与褐黄色粉质粘土混合层	0~1.85	P (MPa)	1.38	9.398	583.0	583.0				16.057	70.9	1067.0
淤泥质粉质粘土	1.85~2.55		0.48	0.783	64.0	64.0	0.85	8.5	77.9	1.350	58.8	182.6
粉质粘土	2.55~3.70		0.98	1.794	83.0	83.0	1.97391	10.0	101.3	2.069	4.8	110.9
砂质粉土夹粉质粘土	3.70~8.35		3.87	4.668	20.6	20.6				5.136	10.0	32.6
淤泥质粘土	8.35~10.0		0.61	0.624	1.7	1.7				0.608	-2.6	-0.9
钢渣与褐黄色粉质粘土混合层	0~1.85	S (KPa)	31.7	38.0	20.0	20.0				122.7	223.0	287.6
淤泥质粉质粘土	1.85~2.55		8.7	22.1	153.9	153.9	23.1	4.5	165.3	41.9	81.0	380.2
粉质粘土	2.55~3.70		13.1	39.8	204.0	204.0	39.7	-0.2	203.3	39.5	-0.4	202.0
砂质粉土夹粉质粘土	3.70~8.35		62.1	67.5	8.7	8.7				77.5	14.8	24.8
淤泥质粘土	8.35~10.0		9.7	7.9	-18.7	-18.7				13.2	67.5	36.2

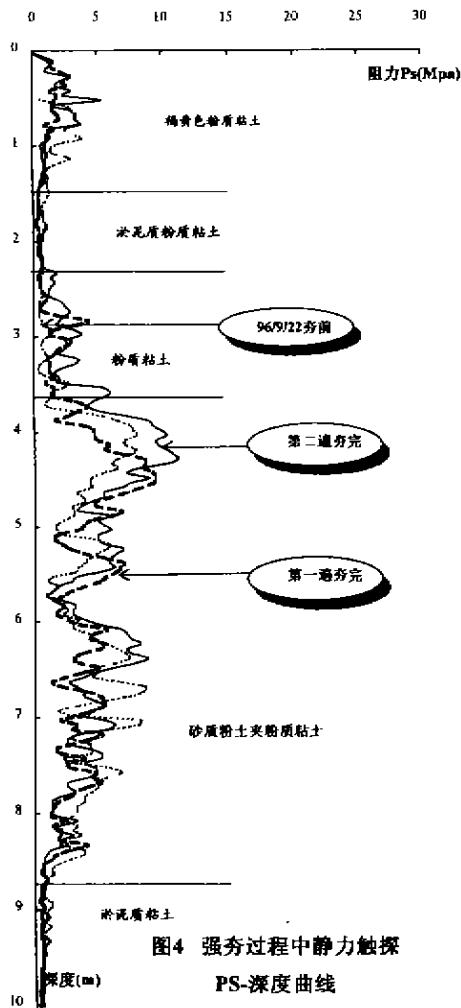


图4 强夯过程中静力触探  
PS-深度曲线

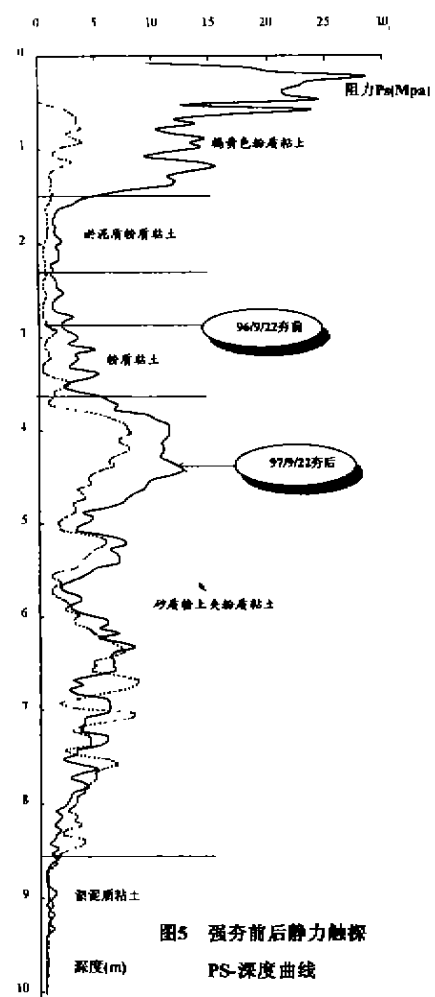


图5 强夯前后静力触探  
PS-深度曲线

见图4。强夯前后静力触探比贯入阻力对比曲线见图5。强夯后各土层静力触探比贯入阻力增长历时曲线见图6。强夯过程中经过整理的孔隙水压力历时曲线见图7。

#### 3.4 上述实测的图表中反映出如下几个特点:

(1)在强夯过程当中,土体强度变化不大,有些层位甚至比原来强度还低。强夯结束以后固结一定时间,土体强度才能恢复、提高,具有明显的时效性。

(2)强夯完成以后,不同时段增幅强度不同。0~25天内增幅最大。一般土层在25天内的强度已基本接近最大值。这一点和目前的地基规范要求一致。但是,表层土(垫层材料与土的混合层)在25天内仅仅是其最终强度的一半(以一年后的强度为最终强度)。该混合层一年内强度一直增长,和强夯刚完成时相比,增幅可达10倍。强夯形成的硬壳层有明显的时效性。在上海和邻近地区的

强夯试验、施工、观测中,尽管没有实测的加固前后强度对比资料,但这种工程现象是普遍存在的,有共性的。从这里也进一步可以看出软土地基强夯的成败和硬壳层的关系是多么的紧密。

(3)土质不同,时效性不一样。表层土(垫层材料与土的混合层)“硬化”过程历时较长,时效最明显。淤泥质粉质粘土,随着时间的推移,慢慢地“硬化”。粉质粘土和砂质粘土夹粉质粘土层,则在强夯结束3—4周后,其强度已接近其最大值。

(4)影响深度一般不超过8米。从上到下,加固效果由大到小。

(5)超孔隙水压力强夯时增长很快,强夯后消散也很快。图中峰值很明显。经历10—15天左右,平均消散75%以上。由于场地原因,没有条件继续观测。因此,没有进一步的资料,但可以看出基本的趋势,即:随着时间的推移,超孔隙水压力会进一步消散,不同的土层消散的快慢不一样。

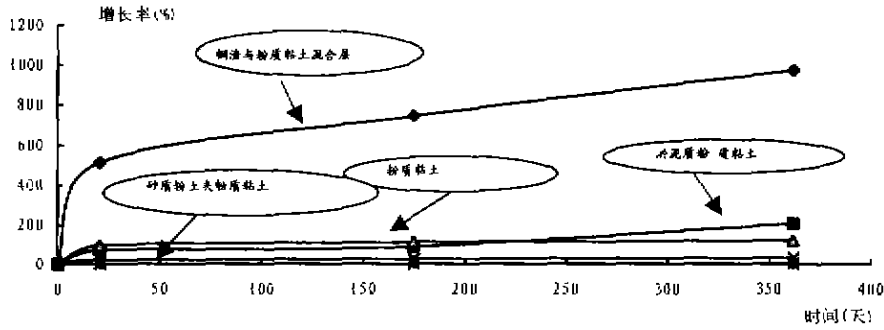


图 6 强夯后各土层静力触探比贯入阻力增长历时曲线

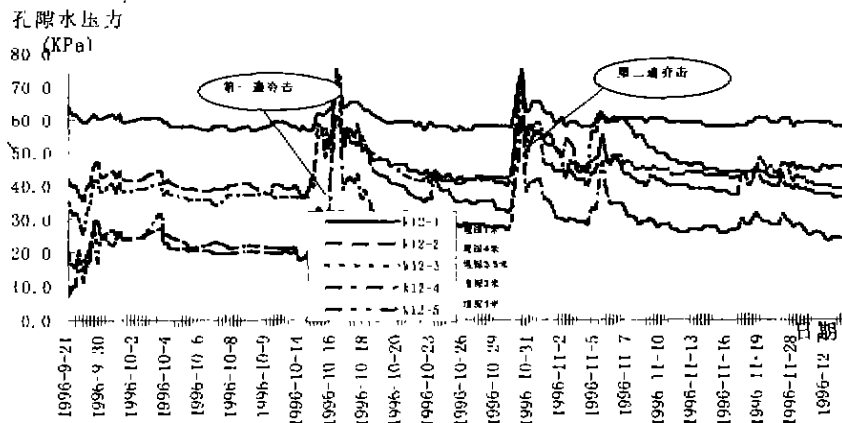


图 7 孔隙水压力变化曲线

### 4 原因分析

对表层土(垫层材料与土的混合层),表现为强度大幅增加,不断“硬化”。大致有如下几个原因:

- (1)大块固体垫层材料之间的间隙因强夯压密;
- (2)粉质粘土充填进去,增加了块体之间的粘着力;
- (3)粉质粘土、压碎的垫层材料、粗粒垫层材料构成级配良好的混合体;
- (4)强夯刚完成时,表层土的含水量较高。随着时间的推移,地下水位趋于稳定,含水量降低。粘土本身的强度提高,从而提高了混合层的整体强度,表现为逐渐“硬化”(固结“硬化”)。

对埋深较浅的淤泥质粉质粘土,只要夹有砂性透水体(层理),随着时间的推移,超孔隙水压力渐渐消散,仍然会发生缓慢的固结,即较慢“硬化”,同时地基沉降。引起固结的作用力应有两个

方面:垫层材料的自重应力和强夯所产生的残余应力。

对于透水性较好的粉质粘土和砂质粉土,强夯结束后 3—4 周,基本完成了大部分的固结。

### 5 几点看法

(1)强夯的时效性取决于夯击对象的固结特性。

不同的土层,强夯作用的固结特性不同。竣工验收时的一些指标可能并不是强夯效果的最终指标。特别是表层土(垫层材料与土的混合层)的强度,随着时间的推移,强度仍会有较大的提高。实测的资料表明,有效的固结时间达一年以上。

(2)埋深较浅的淤泥质粉质粘土,由于有良好的排水通道,强夯后强度仍提高较大,时效性明显。良好的排水通道是强夯成功的基本条件。

(3)用静力触探方法测定硬壳层的强度、厚度是比较可靠的。在竣工验收效果检验时,应增加测点数,以利于检验硬壳层的均匀性,更能正确的评

价强夯效果。

在完成本文过程中,得到了浦东国际机场飞行区指挥部、同济大学和华东民航设计院联合监理部、我院浦东国际机场试验小组的大力协助。三航一公司浦东国际机场项目部也给作者很多帮助,在此一并致谢。

#### 参考文献

- [1]DBJ08—40—94 上海市标准《地基处理技术规范》  
 [2]《地基处理手册》编写委员会编,地基处理手册 中国建筑工业出版社,1988。  
 [3]DBJ08—11—89 上海市标准《地基基础设计规范》

## The Time-effects of Strong Puddling Method for Soft Soil Foundation

Wang Hongtai

(Shanghai Harbor Engineering Design Institute Shanghai 200032)

Cheng Jiafu

(Xia Men Port Office Xia Men 361000)

According to the data from the static sounding test with different time during strong puddling foundation project for the runways in the flight area of Pudong International Airport, the paper mainly has discussed the time-effect phenomena of the strength increasing for foundation puddling mainly composed of clay soil and also concluded that the foundation, mainly composed of clay soil, has the lag property when doing reinforcement by strong puddling method.

**Key word:** foundation mainly composed of clay soil, strong puddling method, time-effect, hard crust layer

· 会 讯 ·

### 关于同意辛本智同志辞去学会理事长 (法人代表)和补选张阿根同志担任 理事长(法人代表)的决议 (一九九九年四月六日)

上海市地质学会五届六次理事会议根据《上海市社会团体组织通则》第十六条、第十七条、第十八条、第二十条和地质学会章程的有关规定,同意辛本智同志辞去学会理事长(法人代表)职务的申请。经与挂靠单位、理事单位协商提名,五届六次理事会选举,补选张阿根同志担任五届理事、常务理事、理事长(法人代表)职务。

五届六次理事会衷心感谢和高度评价辛本智同志担任理事长期间卓有成效的工作,号召全体会员在理事会和新任理事长的领导下,团结一致,为全面实现五届理事会的任期目标而努力。

上海市地质学会

下转第 25 页

时,可取 $\gamma$ 大于1。

### 参考文献

- 1 朱百里 沈珠江等:计算土力学,上海科学技术社。
- 2 杨敏:以控制沉降为设计目标的减少沉降桩基础之研究,桩基设计新思路“以沉降为指标的复合桩基设计学
- 3 宰金珉:桩土明确分担荷载的复合桩基及其设计方法,建筑结构学报,1995.8
- 4 上海市标准:地基处理技术规范,DBJ08—40—90。
- 5 刘金砺,黄强,李华,高文生:竖向荷载作用下群桩变形性状及沉降计算。岩土工程学报 1995.6

术研讨会”,98上海科技论坛活动之一。

## Research on safe coefficient of Bearing capability of Creep Piled foundation

Hu zhanfei Daijinlin

(Geotechnical Department of Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract:** this paper puts forward a practical calculated model of bearing capability of soil among group piles with cushion cap According to static load tests, safe coefficient about bearing capability of piles( $k_1$ ) and safe coefficient with respect to soil between piles( $k_2$ ) are available. The relationship among  $k_1$ ,  $k_2$  and  $n$  (ratio of pile diameters),  $\gamma$  (the factor of development of single pile bearing capability) are also discussed

**Key word:** creep piled foundation safe coefficient Bearing capability

上接第11页

### 关于上海市地质学会增补理事、 常务理事任免理事长的批复

上海市地质学会:

你会关于增补理事、常务理事、任免理事长的请示悉。

同意增补张阿根同志为学会第五届理事会理事、常务理事并任理事长,辛本智同志不再担任学会理事长职务,希望在下次会员(代表)大会上予以确认。

此复。

上海市科学技术协会

1999年4月15日

### 勘误

总68期18页

更正图下说明,左上图为4(C),顺时序:4(D),4(A),4(B)。