强夯法加固饱和粉性土试验

蒋建良　　王列平
(浙江省工程勘察院，宁波，315010)　(中国民航机场建设工程公司，北京，100101)

提　要　本文通过对饱和粉土降水强夯和填石强夯的试验研究，表明降水强夯和填石强夯适用于本区饱和粉性土。孔隙水压力检测反映了砂性土的特征，大面积施工时可连续夯击；加固后强度指标明显增长，加固的有效深度达到了 7 米。综合分析表明，夯击能 2000kN·m 的填石强夯更具优势。

一　前　言

强夯法加固软弱地基，因其设备简单，操作方便，效果显著，质量容易控制，经济效益好而得以广泛应用。强夯法适用于碎石土、砂土、一般粘性土、杂填土的加固。对于饱和土，则需辅以配合手段，如饱和粉土，需降低地下水位或辅以填石，而对饱和粘性土和淤泥质土，在采用置换形成硬壳层及排水措施后也取得了良好的效果。

试验场地位于杭州市南岸，属钱塘江河口冲海积平原，其地层结构为：上部为粉土，层厚 7 米左右，5 米以上性质差，粒度成分以粗粉粒(0.074～0.01mm)为主，其含量一般大于 85%，天然含水量大于 30%，孔隙比 e=0.817～0.921，个别大于 1，标贯击数 N=3～13 击，静探 q_c=1.6～3.8MPa，局部 q_c=0.6～1.6MPa。大多呈稍密—松散状态，并可进一步细分为 1b、2a、2b、2c 层；下部为中密状粉砂，厚约 12 米包括 3a、3b 层。场地浅部粉土具强度低、不均匀沉降及液化问题，不能满足工程需要，须进行地基处理。

场地浅层地下水为孔隙潜水，其透水性较弱，单井出水量一般小于 50m²/d，水位埋藏较浅，随季节性变化，一般埋深 0.3～2.5 米。

二　地基处理试验

1. 地基处理试验方案

鉴于场地粉土属饱和细粒土，直接在其上强夯，由于超孔隙水压力不能及时消散，地下水不能及时排出，易形成所谓的“橡皮土”，故采用降水强夯和填石强夯两种试验方法。试验方案详见表 1。

2. 强夯参数及技术标准

(1)降水强夯 Hw

降水采用点井方案，降水要求：井点附近降至地面下 5～6 米，井排间地下 4 米，降水达到要求后在原地面强夯。

①强夯参数

表 1　试验方案分区表

方案代号		分区名称	试验面积(m)	说　　明
Hw		降水强夯	30×60	1.先降水，后在原地面直接强夯 2.夯击能 2000kN·m
	Ho1	结构填石强夯区	30×15	1.一次性填石至设计高程，填石厚度 1.8m 2.夯击能 4000kN·m
Ho	Ho2	填石强夯区	30×30	1.分层填石，每次厚度 0.5m 2.夯击能 2000kN·m
	Ho3	结构填石强夯区	30×15	1.一次性填石至设计高程，填石厚度 1.8m 2.夯击能 3000kN·m

夯锤直径 2.5m，重量 125kN，底面积 4.9m²，落距 16m，夯点按等边三角形布置，点距 3.3m。夯击能 2000kN·m，强夯时隔点不隔行，点夯两遍后推平满夯，满夯标准为一遍连夯，其夯击能 1000kN·m，击数 2 击。

②点夯停夯标准

坑深：1.2～1.5m

击数：6～10 击

击差：最后两击累计沉降差＜0.05m

(2)填石强夯 Ho 区

填石强夯采用两种填石方式，三种夯击能，有关参数详见表 2。

表 2　填石强夯区有关参数表

分区代号及特征	强　夯　参　数	停　夯　标　准
Ho1 一次性填石 至设计高程	点夯击能：4000kN·m 锤重：200kN 锤径：2.5m 落距：20m 布置：等边三角形，点距 3.3m 点夯 遍数：2 遍，隔点不隔行 满夯：1 遍，夯击能 2000kN·m 击数：2 击	坑深：第一遍 1.2m 第二遍 0.8m 击数：6 击 击差：最后二击累计沉 降差＜0.05m
Ho2 二遍填石，一次 填石厚度 0.5m	点夯击能：2000kN·m 锤重：125kN 锤径：2.5m 落距：16m 布置：等边三角形，点距 3.3m 点夯 遍数：1 遍连夯，隔点不隔行 满夯：1 遍，夯击能 1000kN·m 击数 2 击	坑深：第一遍 1.2m 第二遍 0.8m 击数：8～12 击 击差：最后二击累计沉 降差＜0.05m
Ho3 一次性填石 至设计高程	点夯击能：3000kN·m 锤重：200kN 锤径：2.5m 落距：15m 布置：等边三角形，点距 3.3m 点夯 遍数：2 遍，隔点不隔行 满夯：1 遍，夯击能 1500kN·m 击数：2 击	坑深：第一遍 1.2m 第二遍 0.8m 击数：8 击 击差：最后二击累计沉 降差＜0.05m

三　加固效果检测

1. 检测工作布置

采用钻孔取样试验、标贯试验、静力触探试验、载荷试验、孔隙水压力观测及振动加速度试验等综合手段，分区分期进行测试，分析对比，确定加固效果及有关参数。

工前检测：利用钻孔取样、标贯试验、静探试验求取试验场地岩土参数背景值。

工间检测：强夯施工时，观测孔隙水压力及振动加速度的变化特征。

工后检测：分为两次，第一次为强夯完成立即进行，其时间一般在强夯完成后 1～2 天；第二次在填石完成后进行，其时间一般在强夯后 10 天左右。两次检测均在工前测试孔 1 米范围内同一深度进行相同内容的测试工作。

2.孔隙水压力检测

(1)孔隙水压力消散特征

强夯时，孔隙水压力增长及消散均较快，在夯锤落地 10 秒钟内，孔隙水压力达到峰值，其历时在夯点下最短，水平向随测点距离增加而增加，但同一测点不同深度峰值出现的时间则无规律性。停夯后，孔隙水压力快速消散，一般在 1～2 分钟内消散至峰值的 45%～60%，5 分钟消散至峰值的 30%左右，10～12 分钟基本消散至峰值 10%以内。图 1 为孔隙水压力与时间关系曲线。因此，场区大面积强夯时可连续施工。

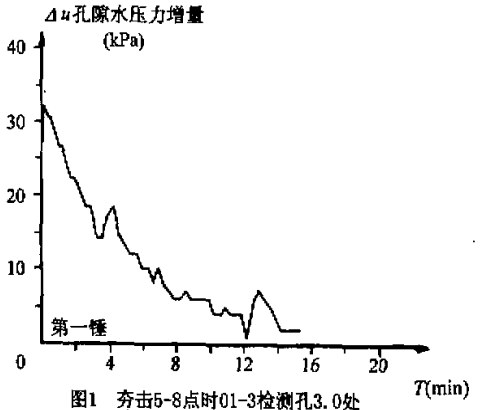


图1　夯击5-8点时01-3检测孔3.0处
孔隙水压力增量连续时间过程曲线

(2)最佳夯击能

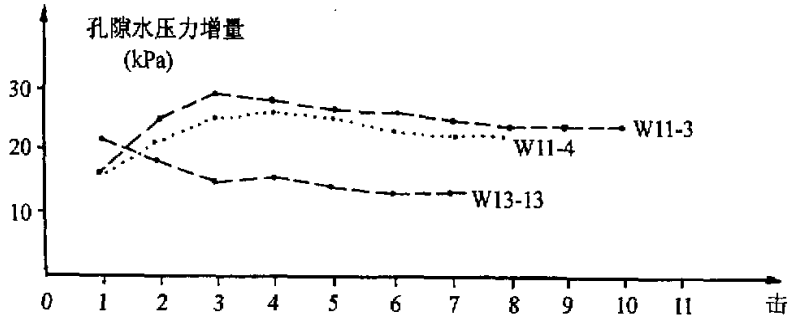


图2　夯击5-15点时，不同检测点最大隙水
压力增量(Δu)与夯击次数关系曲线

理论上说，能使地基中的孔隙水压力达到土的上覆压力时的夯击能称之谓最佳夯击能。场区强夯时孔隙水压力消散很快，表现出砂性土孔隙水增长与消散的特征，因此可用

孔隙水压力增量与夯击次数的关系曲线来确定最佳夯击能，当孔隙水压力增量随夯击次数逐渐趋于稳定时的能量即为最佳夯击能。图 2 表明 Hw 区在锤重 125kN，落距 16m 条件下最佳夯击数为 6 击，最佳夯击能为 12000kN·m。

(3)孔隙水压力与深度及距离的关系

图 3 为孔隙水压力与深度的关系曲线，在垂向上，地表下 3 米处出现孔隙水压力最大值，往下随深度增加而减小，8 米以下仍有变化，其值在大夯击能时(填石强夯 4000kN·m)为最大值的 40%左右，而小夯击能仅为最大值的 20%。

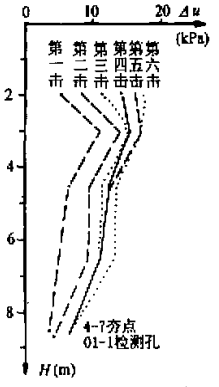


图3 Ho区01-1孔孔隙水压力增量-深度变化曲线

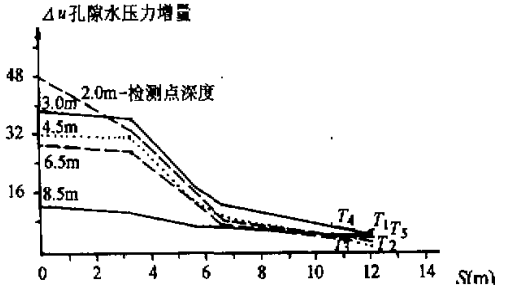


图 4 距 01-1 检测也不同距离处孔隙水压力分布曲线

图 4 为孔隙水压力增量与水平距离的关系曲线。在连续夯击时，水平方向距夯点 6 米时检测到的孔隙水压力增量明显降低，为夯点下的 30%，8 米左右降为 15%，距夯点 10 米远时则孔隙水压力变化不明显。小夯击能影响范围要更小，其明显降低的地方在距夯点 4～5 米处。

3. 地基处理效果

(1) 地基土原位测试及土工试验指标检测处理后地基土。

①各种指标均有不同程度的提高，其中静探和标贯指标更加明显。加固效果与地基土性质及埋深有关，原性质较差的粉土提高幅度最大。加固后土体强度明显增加且趋于均一。

②强夯处理后土体强度的恢复及增长有明显的时间效应。从图 5、图 6 中可知，夯后十天的填后检测比夯后一天的工后检测：N 值和 q_c 值均有明显的增加，其提高的幅值在 15%～50%。浅部增加更多。其原因在于结构填石时的振动碾压作用，碾压的有效深度在 3～4 米。

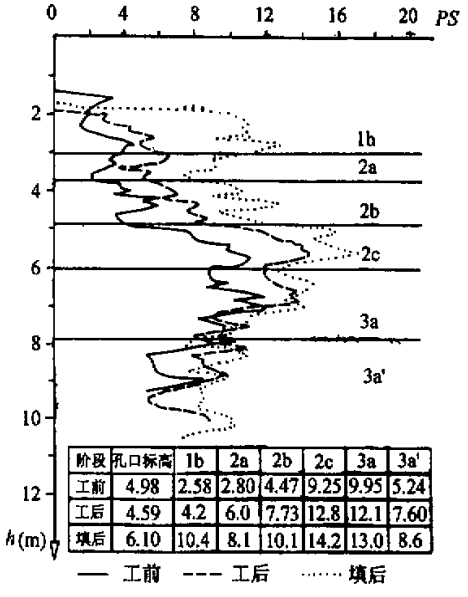
③Hw 区工后检测值中以地表下 2～5 米间指标增幅最大，从各种指标综合，7 米以上各种指标变化明显，7 米以下，标贯有所变化，但土试和静探指标变化不明显，其加固有效深度在 7 米左右。

④Ho 区 4～5 米以浅指标增幅最大，7 米以下则变化不明显，个别指标甚至与夯前一样，其加固效果达到了 7 米。Ho1 区填后 N 值均大于 24 击，比工前提高 2.7 倍，Ho2 区 N 值在 20 击左右，比工前提高 1.7 倍，Ho3 区 N 值小于 20 击，比工前提高 0.4 倍。表明 Ho1、Ho2 区处理效果好于 Ho3 区。

(2)静载荷试验

静载荷试验内容包括回弹模量、地基反应模量、变形模量和承载力测试。工前在原地表下挖除表土进行，处理后在填石层顶面进行，试验结果见表 3。

根据国际民航组织附件 14 关于土基强度类型的规定，加固后的土体属于高强度类型，满足了有关技术要求。



阶段	孔口标高	1b	2a	2b	2c	3a	3a'
工前	4.98	2.58	2.80	4.47	9.25	9.95	5.24
工后	4.59	4.2	6.0	7.73	12.8	12.1	7.60
填后	6.10	10.4	8.1	10.1	14.2	13.0	8.6

图 5

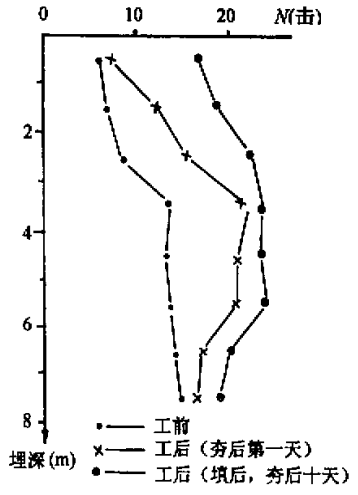


图 6 HW 区标贯击数对比图

(3)地基土抗液化性能

地震液化判别主要依据 GBJ-89 规范，用标贯试验成果分远震和近震分别判定。结果表明：工后除远震条件下个别点有液化外，其余均不液化，而填后则完全消除了液化土层。

表 3 静载荷试验成果表

项目 / 分区	回弹模量 Eo (MPa)		反应模量 Ku (MN/m³)		变形模量 E (MPa)		承载力 (kPa)	
	工前	填后	工前	填后	工前	填后	工前	填后
Hw	32.2	115.4		197.2		84.5	70～100	342
Ho	19.5 ～ 23.6	105.4	25～40	150.2	5～7	71.6		

(4)经济分析表明，填石强夯比降水强夯更为经济。从施工便利角度分析，则 Ho2、Ho3 更具优势。

四 结 语

(1)对饱和粉土，采用降水强夯和填石强夯加固处理，取得了良好效果，且强夯施工简单，质量容易控制，费用低廉，适用于本区大面积软弱地基处理。

(2)孔隙水压力检测表明，强夯时孔隙水压力增长及消散较快，反应出砂性土特征，大面积强夯施工时可连续夯击。孔隙水压力影响水平距离在10～12米，垂直深度7～8米。

(3)经强夯加固后，地基土各项物理力学指标有不同的增长，尤以力学指标增长明显。强夯后地基土强度明显增加且趋于均一，强度的恢复和增长具时间效应。强夯的加固有效深度在7米左右。

(4)经强夯处理后，原为轻微～中等液化场地变为不液化场地，全面消除了液化。

(5)从经济性及施工便利综合考虑，场地采用 2000kN·m 和 3000kN·m 的填石强夯更为合适。

参考文献

[1] 曾国熙等主编：《地基处理手册》，中国建筑工业出版社，1988.8。

[2] 叶书麟主编：《地基处理工程实例应用手册》，中国建筑工业出版社，1998.3。