

# 大能量强夯在地基处理工程中的应用

阎爱荣<sup>1</sup>, 齐志宏<sup>2</sup>, 张宏勋<sup>1</sup>

(1. 陕西省机械施工公司南京分公司, 南京 210046; 2. 金陵科技学院, 南京 211169)

**摘要:** 通过珠海某工程建设实例, 简介针对不同的基岩埋深、填筑材料等地质情况, 分别采取不同级别的夯击能量进行强夯法加固地基施工, 最终达到了节省工程造价、节约工期并满足地基设计承载力和变形要求的目的。

**关键词:** 高能级强夯; 载荷板; 承载力特征值; 有效加固深度; 差异沉降。

**作者简介:** 阎爱荣(1969—), 女, 山东郓城人, 工程师, 从事施工管理。

## 0 引言

近年来随着施工机械和施工工艺的跨越式发展, 强夯施工能量从 3 000 kN·m 提升到 6 000 kN·m、8 000 kN·m, 目前已经突破 15 000 kN·m 能级, 强夯法处理地基深度也日益加大, 有效加固深度超过 15 m 的已不罕见, 大能量强夯工艺处理工程地基范围越来越广, 能级也越来越高。国民经济的迅速发展, 带动了大批基础设施的建设, 同时为了节约有限的土地资源, 国内外不同程度地出现了开发荒山、滩头以保护耕地, “块石回填山沟”、“炸山填海”、“吹砂填海”等造地建设又推动了大能量强夯施工技术的发展。

## 1 工程概况及地质情况

### 1.1 工程概况

该工程位于广东省珠海市, 地基处理面积约 18 万 m<sup>2</sup>, 拟建油罐基础, 夯前地基土为冲填砂土及块碎石回填层。大面积强夯施工前, 通过试验确定了针对不同施工区域采取不同能级的施工参数。

### 1.2 地质情况

(1) 碎石层: 黄褐及灰白色, 主要由花岗岩碎石堆积而成, 结构松散, 呈稍湿的松散状态。厚度 0.5~12.8 m, 平均 3.23 m, 属于不均匀的中等压缩性地基土。

(2) 冲填土: 灰色、褐灰色, 主要由粉细砂冲填而成, 有较多的黏性土及贝壳碎片, 结构松散,

呈饱和的松散状态, 厚度 0.5~7.5 m, 平均厚度 3.27 m。

(3) 块石层: 主要由花岗岩块石及碎石堆积而成, 黄褐及灰白色, 厚度 0.5~6.5 m, 平均厚度 1.88 m。

(4) 第四系海陆交互相沉积层, 包括:

① 淤泥: 深灰、灰色, 含贝壳碎片, 局部混少量粉细砂, 偶见腐殖物, 呈饱和的流塑状态, 厚度 0.6~12.0 m, 平均 3.25 m。

② 中风化层, 黄褐及灰白色, 中粗粒结构、块状构造, 该层埋藏深浅不一, 揭露厚度 0.30~6.10 m, 平均揭露厚度 2.08 m。

## 2 地基处理技术要求

(1) 地基处理后的地基承载力特征值  $f_{ak} \geq 300$  kPa, 压缩模量  $E_s \geq 12$  MPa;

(2) 投产后 1 年沉降量  $\leq 20$  cm, 其中: 20 000 m<sup>3</sup> 罐的差异沉降  $\leq 17$  cm, 其他罐的差异沉降  $\leq 12$  cm;

(3) 有效加固深度: 从设计标高算起, 中风化花岗岩埋深在 12 m 以内, 有效加固应至中风化花岗岩岩面, 超过 12 m 的有效加固深度应不小于 15 m;

(4) 消除砂土层的液化性。

## 3 地基处理方案与试夯参数确定

### 3.1 施工目标与难点

(1) 深层淤泥层的处理。

(2) 满足加固深度不小于 15 m 的要求。

(3) 满足处理后承载力特征值  $f_{ak} \geq 300$  kPa, 压缩模量  $E_s \geq 12$  MPa 的要求。

### 3.2 总体规划

根据不同工程地质情况进行分区处理, 以先进设备和施工方法, 结合丰富的施工实践经验保证加固效果, 精心施工, 科学管理, 争创精品。

### 3.3 初步施工参数设想

根据工程地质勘察资料, 以及拟建上部结构对于地基的力学技术要求, 针对不同的基岩面埋深及淤泥、冲填土厚度等, 将本项目地基处理的施工范围划分为三个处理区域。

(1) 基岩埋深小于等于 8 m 的区域, 拟采用单击能量为 3 000 kN·m 的低能量强夯加固。

(2) 基岩埋深大于 8 m、但不超过 12 m 的区域, 拟采用单击能量为 6 000~8 000 kN·m 的中等能量级进行强夯处理施工。

(3) 对于基岩埋深大于 12 m 的区域, 拟采用单击能量为 10 000~14 000 kN·m 的高能量级进行施工。

(4) 为便于施工和提高作业效率, 强夯点布置采取正方形布点, 夯点间距根据夯击能量大小进行适当的调整, 以取得最佳的处理效果, 夯后辅以振动碾压。

## 4 强夯设计参数与强夯试验

综合考虑工程地质情况以及前述试夯参数, 本强夯处理地基项目拟设置单击夯击能量分别为 3 000 kN·m、6 000 kN·m、8 000 kN·m 和 10 000~14 000 kN·m 四个强夯试验区, 各试验区拟定的设计施工参数以及欲处理深度范围如下。

### 4.1 3 000 kN·m 强夯区

本能级强夯拟有效处理深度 4~6 m, 强夯加固分三遍进行。第一、第二遍为 3 000 kN·m 点夯, 夯点间距 5.0 m, 呈正方形布置。夯点的夯击次数暂定 8~10 击, 夯点的收锤标准以最后两击的平均夯沉量小于 5 cm 控制。最后一遍为 1 500 kN·m 能级的满夯, 每夯点夯击 2~3 击, 要求夯锤的底面积彼此搭接 1/3。

### 4.2 6 000 kN·m 强夯区

本能级强夯拟有效处理深度 6~8 m, 强夯加固分四遍进行。第一、二遍为 6 000 kN·m 强夯施工, 夯点的间距为 8.0 m, 正方形布置夯点。每夯

点的夯击数暂定 10~12 击, 夯点的收锤标准以最后两击的平均夯沉量小于 10 cm 控制。第三遍为 3 000 kN·m 强夯施工, 夯点位置为第一遍、第二遍相临夯点的中间位置, 夯击数 8 击, 夯点的收锤标准以最后两击的平均夯沉量小于 5 cm 控制。最后一遍为 2 000 kN·m 能级的满夯, 每点夯两击, 要求夯锤底面积彼此搭接 1/3。

### 4.3 8 000 kN·m 强夯区

本能级强夯拟有效处理深度 8~12 m, 强夯加固分四遍进行。第一遍和第二遍的夯击能均为 8 000 kN·m, 夯点间距为 9.0 m, 正方形布置夯点, 夯击数暂定为 12~15 击, 实际夯击数以最后两击平均夯沉量不大于 15 cm 控制。第三遍的夯击能为 4 000 kN·m, 夯击数暂定为 10 击, 实际夯击次数以最后两击的平均夯沉量不大于 5 cm 控制, 第三遍夯点在第一、二遍四个相邻主夯点的中间插点。第四遍采取满夯施工, 夯锤底面积彼此搭接 1/3, 借此夯实坑底以上的回填土。

### 4.4 10 000~14 000 kN·m 强夯区

综合考虑各种因素, 最终以 10 000 kN·m 单击夯能进行试验。本能级强夯拟有效处理地基土深度 12~16 m, 强夯加固分四遍进行。第一遍和第二遍的单击能均为 10 000 kN·m, 夯点间距为 9.0 m, 正方形布点, 夯击数暂定为 15~20 击, 实际夯击数以最后两击平均夯沉量不大于 20 cm 控制。第三遍夯击能为 6 000 kN·m, 夯击数暂定为 12 击, 实际夯击次数以最后两击的平均夯沉量不大于 10 cm 控制。第四遍满夯施工, 能级为 2 000 kN·m, 每点夯两击。

试验区主夯最佳夯击的次数通过单点夯击能试验确定, 强夯施工之后按规定进行振动碾压处理。

## 5 强夯主要施工设备

强夯试验施工配备的主要机械设备为强夯机以及强夯锤、推平、振动碾压等为常规设备。

单击夯击能在 3 000 kN·m 及以下的, 采用 W200A 型履带式起重机作为强夯机, 扒杆接长 23 m, 夯锤重量 160 kN, 直径 2.2 m, 锤底静压力 42.11 kPa;

单击夯击能在 4 000~6 000 kN·m 的, 采用 W200A 型履带式起重机作为强夯机, 扒杆接长

23~26 m, 附带高度 26 m 的龙门架, 夯锤重量 320 kN, 直径 2.4 m, 锤底静压力 70.77 kPa;

单击夯击能在 8 000~10 000 kN·m 的, 采用 W200A 型履带式起重机作为强夯机, 扒杆接长 26~28 m, 附带高度 28~30 m 的龙门架, 夯锤重量 400 kN, 直径 2.4 m, 锤底静压力 88.46 kPa。

## 6 试验区强夯施工

在本工程的四个强夯区分别选择地质情况较差、处理深度最大且有代表性的区域进行试验, 3 000 kN·m 能级强夯试验区, 面积 20 m×20 m; 6 000 kN·m 能级强夯试验区, 面积 32 m×32 m; 8 000 kN·m 能级强夯试验区, 面积 32 m×32 m; 10 000 kN·m 能级强夯试验区, 面积 32 m×32 m。

由于场地上部回填土的非均质性以及下部地基土的变异性, 各工程试验区通过进行单点夯击能试验来确定和验证前期策划效果, 对设计参数进行校验。

强夯夯击能试验时, 夯坑周围地面不应发生过大隆起; 不因夯坑过深而发生提锤困难; 各区夯击点的夯击数, 应使试验区土体竖向压缩量最大, 而发生侧向位移最小为原则。

由于本工程 10 000 kN·m 以上能级夯坑深度较大, 推平回填后对夯坑中回填土须进行原点加固, 即在填料推平后在原 10 000 kN·m 夯点位再进行 6 000 kN·m 能级加固夯, 击数 5~8 击, 最后两击的平均夯沉量小于 10 cm (不同于策划 10 000~14 000 kN·m 能级试验区中的第三遍夯击), 正式施工中应予以充分注意。

## 7 试验检测

为了验证当初强夯试验施工参数, 检验检测地基试验加固效果, 强夯试验过程中以及夯后进行了地面变形和土体孔隙水压力监测、夯后超重型动力触探、瑞雷波、静载试验等, 通过检测确定地基承载力、压缩模量是否满足设计要求。最大加载量按设计要求地基承载力特征值的 2.4 倍加载。本文以 10 000 kN·m 强夯区部分试验数据来分析地基加固效果。

### 7.1 孔隙水压力监测

从监测数据来看, 整个施工过程中, 超孔隙水

压力变化很小, 两遍强夯施工可以连续进行 (图 1)。

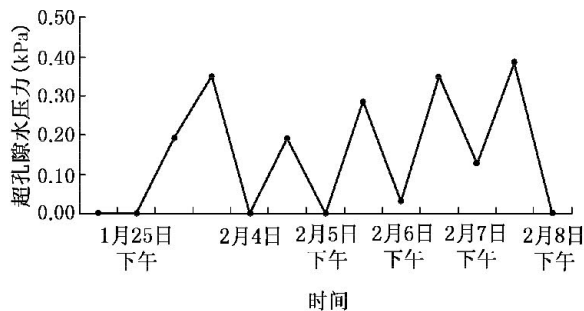


图 1 1044# 超孔隙水压力历时曲线

### 7.2 夯后超重型动力触探试验

表 1 夯后动探击数综合密实度分层表

范围 (m)	厚度 (m)	平均击数 N120 (击)	密实度	地基承载力特征值 $f_{ak}$ (kPa)	变形模量 (MPa)
0~4.0	4.0	13.8	密实	820	53
4.0~14.0	10.0	7.8	中密	630	35
14.0~18.5	4.5	3.7	稍密	285	19
18.5~20.0	1.5	9.9	中密	700	44

从表 1 中数据看出, 地面以下 20.0 m 范围内, 0~14.0 m 地基承载力特征值  $\geq 630$  kPa, 14.0~18.5 m 地基承载力特征值  $\geq 285$  kPa, 18.5~20.0 m 地基承载力特征值  $\geq 700$  kPa。试验数据表明强夯试验基本达到了预期目的, 为提高 14.0~18.5 m 地基土的承载力, 大面积施工时可适当提高夯击能力或夯击击数。

### 7.3 瑞雷波测试

根据对试验区夯前、夯后单点瑞雷波测试, 判断强夯有效加固深度。具体的各个试验点面波波速统计及地基承载力特征值计算如表 2、表 3 所示。

表 2 试验区面波波速统计表

深度范围 (m)	各测点分层等效横波波速 (m/s)							波速提高 (%)
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	夯前	
0~4	247.9	251.8	235.8	250.8	257.7	239.6	194.8	27%
4~8	228.7	226.8	223.9	255.8	212.9	295.2	188	28%
8~12	228.6	219.9	242.4	292.8	249.7	318.1	202.9	27%
12~16	263.2	262.9	266	250.8	258.2	387.2	227.3	24%

表3 根据面波波速计算地基承载力特征值(kPa)

深度范围	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
0~4	372.5	378.3	354.3	376.8	387.2	360.0
4~8	343.5	340.8	336.4	384.3	319.9	443.5
8~12	343.5	330.4	364.2	439.9	375.2	477.9
12~16	395.5	395.0	399.7	376.8	387.9	581.8

根据以上夯前、夯后数据分析,试验区地层15 m以内地基加固效果显著,波速均大于200 m/s,地基承载力特征值大于300 kPa。

7.4 地面变形监测

在进行单点夯击能试验的同时,对夯点进行变形观测(包括每击夯沉量和夯坑周围4 m范围内地面的起伏变化情况),夯坑周围地面的起伏变化情况通过在夯点两个互相垂直方向、距离夯点2 m、3 m和4 m距离布置观测点进行监测。其中编号为施工G-3点(第一遍强夯时监测)和施工F-6点(第二遍强夯时监测)的变形监测数据图形化表示如图2、图3所示。

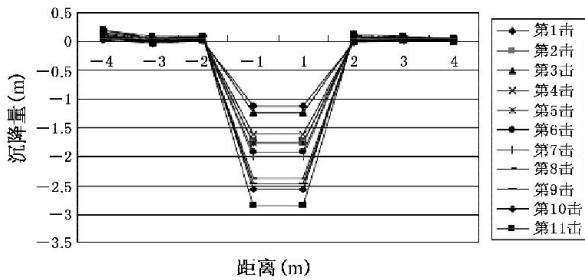


图2 10 000 kN·m 试夯区一遍 G-3 点地面变形监测

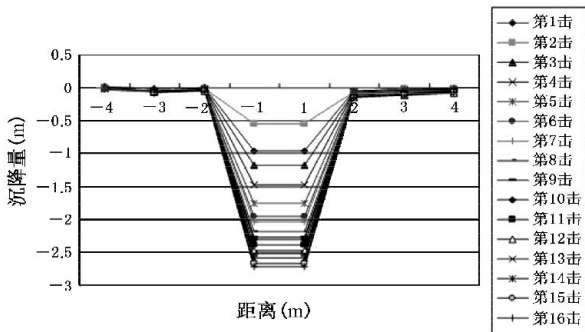


图3 10 000 kN·m 试夯区二遍 F-3 点地面变形监测

除非由于出现夯坑过深而造成施工困难,可以在夯击过程中向夯坑内适量加填料,否则应一次性完成点夯施工。向夯坑内加填料时采取少填料和填小料的原则,少填料主要指在发生施工拔锤困难时,向夯坑内加填不超过坑深1/3的石料,填小料指尽量加填粒径较小的填料(施工中填加的大粒径填料消耗部分夯击能量,减弱夯击效

果)。施工拔锤困难时采取向夯坑中少填料和填小料的目的在于最大限度地将强夯的夯击能量作用于地基土体。

施工G-3点和施工F-6点变形监测数据表明地基土体主要表现为沉降,隆起量较小,表明地基土体被有效压实,效果比较明显。

通过单点夯击能试验确定的每点夯击次数不少于18击,最后两击平均夯沉量不大于20 cm。

7.5 静载试验

(1) 试验点J1-1#的静载试验基本情况见表4。

表4 试验点J1-1#的静载试验基本情况

序号	试验点号	位置	荷载板面积	最大加载量	最终沉降量	试验时间
1	J1-1#	夯间	2.0 m <sup>2</sup>	1 440 kN	16.02 mm	2007.3.7.

(2) 试验点J1-1#静载试验Q-s曲线见图4。

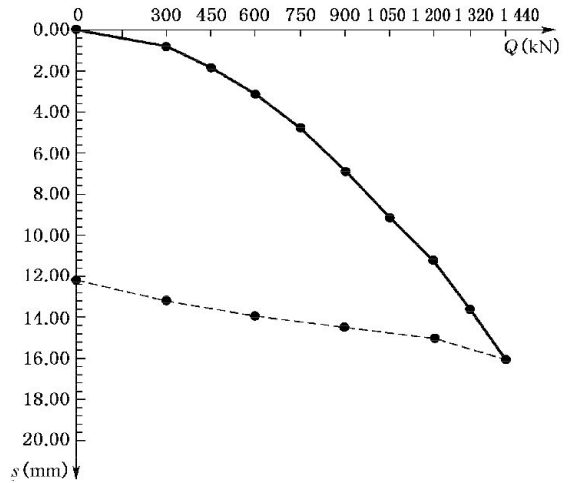


图4 试验点J1-1#静载试验Q-s曲线

(3) 试验点J1-1#静载试验s-lgt曲线见图5。

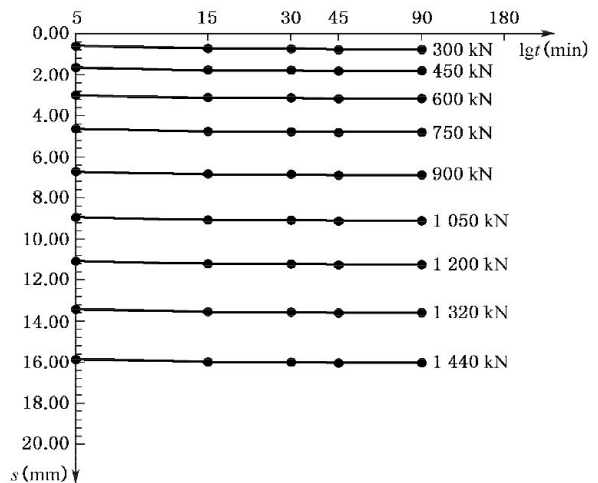


图5 J1-1#静载试验s-lgt曲线

(4) 试验点 J1-1# 静载试验  $s$ - $\lg Q$  曲线见图 6。

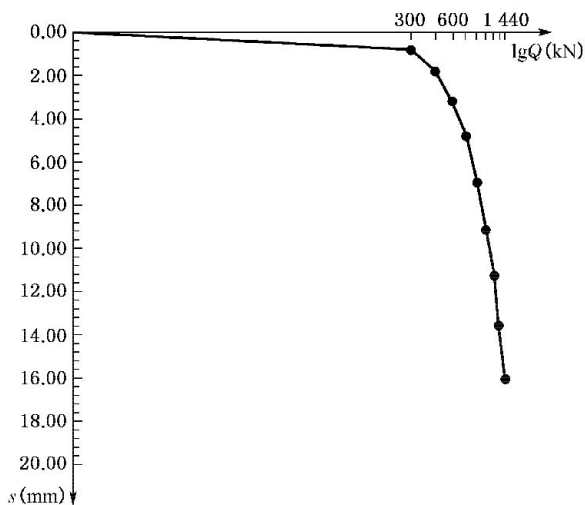


图 6 J1-1# 静载试验  $s$ - $\lg Q$  曲线

## 7.6 试验结果分析

### (1) 静载试验结果分析

① 试验点 J1-1#， $Q$ - $s$  曲线没有出现陡降， $s$ - $\lg t$  曲线也未出现明显弯折，试验点在最大荷载作用下均未达到破坏。

② 试验点 J1-1#， $s/b = 0.01$  对应承载力为 622.5 kPa，按规范建议的变形标准判断，该点的承载力特征值不小于 360 kPa，满足设计要求。

③ 按规范公式： $E_0 = I_0(1 - \mu^2)Pd/s$  计算，试验点 J1-1# 的变形模量为 106.4 MPa，满足设计要求。

### (2) 孔隙水压力监测结果分析

从孔隙水压力监测数据来看，施工过程中设计的两遍强夯施工可以连续进行。

### (3) 有效加固深度和加固效果

根据试验区面波测试数据夯前、夯后波速对比，其提高率在 25% 左右，地面以下 16 m 范围内地基承载力特征值不小于 300 kPa。

综合超重型动力触探、静载试验和瑞雷波测试的试验结果，试验区有效加固深度不小于 15.0 m。

### (4) 试验结论及施工建议

① 本次强夯试验取得了预期的加固效果。

② 工程大面积施工时合理安排施工时间，孔隙水压力对工程的影响较小，理论上可以连续施工。但对由于雨后和地下水位较高而使得夯坑中积水时，应基本清理夯坑积水才能进行施工。

③ 为达到加固地基深层的目的，应在条件许

可的情况下尽可能选择锤底静压力较大的夯锤。

④ 在强夯过程中，发现某些范围内出现夯坑过深、地面隆起等异常情况，作好异常情况处理记录。

## 8 大面积强夯加固地基处理施工

本工程在大面积施工中严格执行试验确定的施工参数，工程业单位委托监理单位进行全过程的施工质量监督、安全监督。

施工中对于夯能过渡区给予了高度重视，并对照地质情况和设计图纸进行核实，发现问题及时向有关方面进行反馈。施工单位处理施工过程中出现的异常情况均有监理工程师在现场进行监督。

针对项目所处地理位置、工程地质情况、地下水对施工产生的不良后果，施工中专门安排具有专业水平的施工队伍进行排水施工。确保施工质量，同时保证项目施工安全顺利地进行。

大面积强夯施工时，为保证施工安全，采取了在满足设计施工参数的情况下，尽量地降低强夯机扒杆接长及龙门架高度。

施工过程中由技术人员会同监理工程师严格把握回填料质量关，控制回填料成分和块石粒径符合设计要求，杜绝不合格回填料进场。

## 9 技术经济分析

本工程采用分区域，针对不同填筑加固深度采用不同级别强夯能量进行强夯，既保证了强夯加固效果，同时也使得工程造价更趋于合理。因为不同夯击能，其对应的工程造价相差是很大的，施工夯能从 3 000 kN·m 到 6 000 kN·m、8 000 kN·m、10 000 kN·m 能级，大致对应着工程造价单价从 30 元/m<sup>2</sup> 到 60 元/m<sup>2</sup>、90 元/m<sup>2</sup>、140~180 元/m<sup>2</sup> 不等，随着强夯能量的提高，其工程造价也成倍增长。

因此，运用强夯法处理地基施工前应结合类似工程经验，通过设计、监理、施工和建设单位讨论研究制定试验参数，通过强夯试验确定合理的单击夯能、单点夯击数、夯点布置等施工参数，达到节约工程造价，满足工程建设需要的目的。

在工程建设最初讨论地基处理施工工艺时，

作为方案对比,也曾经设想采用桩基础、堆载预压、注浆等处理方案。就本工程具体地质情况来说,由于拟加固土体深处大块石的存在,桩基础无论是采取预制桩还是灌注桩工艺,沉桩施工都相当困难,且造价高昂(其造价约为强夯法处理的7~8倍以上),堆载预压工艺的工期无法满足项目建设周期要求,其施工的工期至少为强夯法的5~6倍以上,且无法处理地基土深层,注浆及其他复合地基与强夯技术相比同样存在工期、造价方面的劣势,有的处理方案甚至不可行。经过各种地基处理技术方案比选,最终本工程选用了强夯技术,事实也证明了选择强夯法是正确的。

## 10 结 语

本工程采用的强夯参数基本合理,施工工艺可行,强夯设计方案为处理类似地基情况提供了工程经验参考和依据。

工程分别采取不同级别的夯击能量进行强夯法加固地基施工,最终达到了节省工程造价、节约工期并满足地基设计承载力和变形要求的目的。

由于大能级强夯施工技术发展迅速,我国工程机械制造技术与发达国家相比还有距离,再加上成本因素,目前大能量强夯施工大多采用小吨位起重机配套龙门架(小吨位相对于大能量),施工中必须对机械安全、作业人员的安全给予高度重视,加大安全投入。另外施工效率还比较低,有待于改进和提高。

当然也有报道称设备制造业市场出现了专门针对大能级强夯的新型施工设备,这些设备比较昂贵,对施工场地和操作技术的要求都比较高,其普及应用还受到种种条件限制。

我们相信随着国家科技的发展,目前的这些问题终将迎刃而解。

## 参 考 文 献

- [1] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S].
- [2] 王铁宏主编. 新编全国重大工程项目地基处理工程实录[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [3] 徐旨钧主编. 强夯和强夯置换法加固地基[M]. 北京:机械工业出版社,2004.