

# 高能级强夯工程实践与发展述评

王铁宏<sup>1</sup> 水伟厚<sup>2</sup> 高广运<sup>2</sup> 王亚凌<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国建筑科学研究院, 北京 100013; <sup>2</sup> 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

(<sup>3</sup> 中化岩土工程有限公司, 北京 102600)

**摘要** 为了加固深厚地基, 特别是山区非均匀块石回填地基和抛石填海地基, 必须施加高能级强夯进行处理。本文简要评述了国际上高能级强夯的施工机械, 以及工程实例与高能级强夯在我国二十多个工程中的应用情况和研究现状, 探讨了高能级强夯施工中的几个主要参数对加固效果的影响, 提出了高能级强夯施工中的一些问题和有待研究的课题。

**关键词** 高能级强夯; 有效加固深度; 非饱和土; 施工机具

## 1 绪言

高能级强夯一般是指单击夯击能大于 6 000 kN·m 的强夯<sup>[1]</sup>。当设计有效加固深度大于 10 m 时, 常规的强夯方法及设备难以满足要求, 故需发展应用高能级强夯 (High Energy Level Dynamic Compaction, 简称 HELDC) 方法与设备<sup>[2]</sup>。

与常规强夯法相比, 高能级强夯法可加固处理大厚度非饱和土、大面积重堆载场地、大中型油库、塔基、大型筏板地基、高堤坝、大厚度湿陷性黄土和新填土等, 其有效加固深度可达 10 m~30 m, 可进一步提高地基土强度和均匀性, 降低压缩性, 消除湿陷性, 改善其抵抗振(震)动液化的能力等, 使强夯法的经济高效性得以更加充分地施展。

## 2 国内外研究现状

国际方面, L.Menard (1975) 展示了一种“引人注意的”起重机, 它采用液压驱动的强夯专用三角架, 可以将 40 t 的夯锤提升到 40 m 的高度。法国 Nice 机场跑道地基处理工程要求加固深度达 40 m。为此特制了一台起重量为 2 000 kN, 提升高度为 25 m, 自重 5 500 kN, 具有 186 个轮胎的超级起重机车, 是迄今为止世界上最大的强夯施工机械。该工程实际施工中采用自重 1 700 kN 的钢板叠合锤, 落距 23 m, 单击夯击能约 39 MJ, 加固后回填土强度提高 4 倍, 下部粉土提高约 1 倍, 最大影响深度达 33 m<sup>[4]</sup>。1975 年在孟加拉国的一个化肥厂及其住宅区的地基处理工程, 将 400 kN 的夯锤起吊到 25 m, 即使用了 10 000 kN·m 的高能级强夯来施工。现场测试证明单位面积夯击能 3 500 kN·m·m<sup>-2</sup>~4 500 kN·m·m<sup>-2</sup> 时, 影响深度达 20 m 以上, 其中 16 m 以上加固效果显著。

在英国和美国目前的强夯工程中, 绝大部分夯锤的重量在 6 t~20 t, 落距在 20 m 以内。在英国, 对 150 kN 夯锤落距 15 m 的强夯称为高能级强夯 (Full-Scale Dynamic Compaction), 对夯锤为 60 kN~100 kN 的强夯称为低能级强夯 (Mini Dynamic Compaction)。美国的能级标准略高些, 并在一些强夯工程中用到 330 kN 和 500 kN 的夯锤, 落距 30 m<sup>[5]</sup>, 在新墨西哥等西部五州的湿陷性黄土地基处理中强夯能级都在 2 000 kN·m 以上, 最高能级达到 6 480 kN·m<sup>[6]</sup>; 在怀俄明州使用 9 570 kN·m 的高能级以消除砂质粉土的液化性; 在犹他州使用 10 560 kN·m 的高能级强

夯加固处理冲积尾矿<sup>[7]</sup>。另外, Menard 公司在瑞典用高能级强夯(16 000k kN·m)处理碎石土的有效加固深度也达 30 m<sup>[8]</sup>; Hendy M.S. 在香港采用 14 000 kN·m 和 7 000 kN·m 的高能级强夯置换处理深达 40 m 的海相淤积土, 都取得了很好的效果<sup>[9]</sup>。

与国际上相比, 在 高能级强夯领域, 我国的研究和工程实践还存在一定的差距。我国于 1975 年开始介绍和引进强夯技术, 并于 1978 年底开始在工程中试用, 之后得到迅速推广, 能级也不断增加。中国化学工程重型机械化公司 1991 年开发出了比较成熟完善的 8 000 kN·m 能级强夯装置, 并于 1992 年率先在三门峡火电厂成功使用, 这也是目前我国强夯工程中的最高能级。据不完全统计, “八五”期间, 全国重大工程项目地基处理中采用强夯技术的有文献记载的就达 300 万 m<sup>2</sup> 以上<sup>[1]</sup>。其中使用高能级强夯的有 7 个工程, “九五”至今又有多个工程, 表 1 仅列举了一部分。可见我国的高能级强夯工程主要用于石化工程施工中的生产装置和大型储罐地基, 以消除黄土湿陷性或处理山区非均匀块石回填地基和抛石填海地基。单层 8 000 kN·m 高能级强夯的有效加固深度达 12 m, 多层强夯的处理深度可达 24 m~54 m, 这些工程都取得了显著的经济效益和社会效益。

表 1 高能级强夯工程实例

工程名称	施工时间	主夯能级 /kN·m	施工面积 /m <sup>2</sup>	工程目的或地基土性	有效加固深度	承载力特性
山西潞城化肥厂工程	1983	6 250	18 万	消除大深度黄土湿陷性	14 m	$f_k \geq 280$ kPa
河南三门峡火力发电厂	1992	8 000	9.3 万	消除深度达 18 m 的黄土湿陷性	15 m	$f_k \geq 350$ kPa
大连西太平洋石油化工罐区工程	1993	7 200	1 万	处理山区非均匀块石和粉质粘土回填地基	12 m	$f_k \geq 350$ kPa $E_0 \geq 25$ MPa
惠州马鞭洲油罐区原油码头及配套工程	1995	8 000+8 000	8 万	处理炸岛开山的大块石和碎石填海地基, 填方深度 19 m 双层强夯	24 m	$f_k \geq 300$ kPa
秦皇岛输油泵站罐区原油 10 万 m <sup>3</sup> 贮罐工程	1995	8 000	1 万	处理山区非均匀块石回填地基	10 m	$f_k \geq 350$ kPa $E_0 \geq 25$ MPa
北京燕山石化扩建工程强夯	1995	6 000	5 万	处理山区高填方非均匀大块石和碎石地基, 三层强夯	21 m	$f_k \geq 400$ kPa
惠州威宏仓储油库罐区工程	1996	8 000	1.5 万	处理爆破开山抛石填海夹淤泥质土地基	12 m	$f_k \geq 250$ kPa
贵州瓮福磷肥重钙工程	1996	8 000	15 万	处理山区非均匀块石回填地基	10 m	$f_k \geq 250$ kPa
岳阳石油化工总厂原料工程厂区地基强夯工程	1996	8 000+8 000	11 万	处理山区非均匀碎石和粉质粘土回填地基, 填土厚 17.8 m	17 m	$f_k \geq 350$ kPa
山西电力公司阳城电厂	1997	6 250	5 万	大深度湿陷性黄土地基	11 m	$f_k \geq 250$ kPa
山西焦化集团焦炉易地改造工程	1997	8 000	6 万	加固处理湿陷性黄土地基, 强夯处理总面积 12 万 m <sup>2</sup>	12 m	$f_k \geq 350$ kPa
洛阳石化总厂化纤工程	1998	8 000	4.6 万	消除黄土湿陷性和不均匀性	14.5 m	$f_k \geq 250$ kPa
大连西太平洋石油化工新增原油罐区工程	1999	8 000	7 万	结构疏松的粉质粘土填土, 半开挖半回填的不均匀地基, 双层强夯	17 m	$f_k \geq 320$ kPa

(续)

工程名称	施工时间	主夯能级 /kN·m	施工面积 /m <sup>2</sup>	工程目的或地基土性	有效加固深度	承载力特性
山西太原呼延净水厂	1999	8 000	8 万	加固处理湿陷性黄土地基	14 m	$f_k \geq 400$ kPa
广西防城港九、十泊位码头陆域工程	1999	8 000	7 万	吹填海砂地基, 厚度 5 m~10 m, 沉降量沉降差均要求小于 2 cm	10 m	$f_k \geq 260$ kPa
青岛奥里油中转油库	2000	8 000	3.2 万	处理杂填土含淤泥夹层地基	12 m	$f_k \geq 350$ kPa
青岛港八号码头堆场护岸修复工程	2000	8 000	6.3 万	处理人工杂填土和滨海相淤泥质沉积土, 强夯置换	16 m	$f_k \geq 250$ kPa
温州重交沥青原油罐区	2001	8 000	2.6 万	处理开山碎石夹块石地基	13 m	$f_k \geq 300$ kPa
青岛重交沥青原油库	2001	8 000	3 万	处理大厚度人工填土地基	10 m	$f_k \geq 300$ kPa
兰州—成都—重庆输油管道工程重庆末站地基	2001	8 000+8 000	7 万	半开挖、半回填的不均匀地基, 填土厚度 15 m, 双层强夯	22 m	$f_k \geq 250$ kPa
青岛益佳阳湾原油库	2002	8 000	2.6 万	处理大厚度人工填土地基	12 m	$f_k \geq 300$ kPa
大连港矿石专用码头地基	2002	8 000	21 万	半开挖、半回填的不均匀地基, 爆破碎石填土厚度超过 30 m	35 m	三层强夯 $f_k \geq 300$ kPa
惠州市大亚湾华德石化有限公司增建原油库及配套设 施项目地基处理	2002	8 000	16 万	半开挖、半回填的不均匀地基, 爆破填土厚度超过 12 m, 需加固 深度 17 m, 变形要求严格	18 m	$f_k \geq 300$ kPa $E_s \geq 25$ MPa

### 3 高能级强夯的施工工艺和主要参数

#### 3.1 施工工艺

目前我国大量应用于工程的高能级强夯有 6 250 kN·m 和 8 000 kN·m 两种, 施工工艺设计遵循先深层, 次中层, 最后为表层的处理原则, 且根据所处理层位确定相应的工艺及参数。为取得较理想的加固效果, 一般采用三遍成夯或四遍成夯的施工工艺。三遍成夯施工工艺如下: 高能级强夯 (6 000 kN·m~8 000 kN·m) 主夯, 其目的在于加固深部土层; 利用中高能级强夯 (3 000 kN·m~6 000 kN·m) 进行间夯或复打, 夯点在主夯夯点之间或主夯上复打, 其目的在于加固中部土层; 利用低能级强夯 (1 000 kN·m~3 000 kN·m) 进行满夯, 其目的在于夯实表层松土。四遍成夯工艺即在三遍成夯工艺的基础上再增加一遍满夯, 以进一步提高表层土的强度。

#### 3.1 有效加固深度

在工程实践中, 针对不同的土性条件、工程目的、设计要求和施工工艺, 有效加固深度应采用不同的检测方法和标准。如在软粘土地基上建造大型储罐主要是提高承载力, 减少沉降量和沉降差; 对饱和砂土和轻亚粘土主要是消除在某一震级下的液化性; 对湿陷性黄土和新近堆积黄土既要消除湿陷性, 又要提高强度; 对山区非均匀块石回填地基和抛石填海地基主要是提高承载力和均匀性, 降低压缩性。因此, 有效加固深度是指: 从最初起夯面 (夯前地面整平标高) 算起, 不完全满足工程设计要求的地基土, 经强夯法加固后, 以某种方法测试的土的强度、变形等指标, 达到工程设计要求的深度。

目前, 根据现场试验和工程实践, 有效加固深度多采用 L. Menard 公式的修正形式:  $D = \alpha \sqrt{MH}$  来确定,  $M$  为夯锤重量 (tonnes),  $H$  为落距 (m),  $D$  为有效加固深度 (m),  $\alpha$  为小于 1 的修正系数; 依据不同的土质与施工条件, 总结了高能级强夯的系数值如表 2 所示。

表2 高能级强夯有效加固深度的系数值

研究者	系数 $\alpha$ 值 (能级, /kN·m)	适用土性
Hansbo, S. (1977)	0.75 (16 000)	碎石土、填
Wightman, A. (1988)	0.5~0.8 (6 000)	细粒土至粗
曾祥柱等 (1993)	0.36 (6 500), 0.48 (8 000)	湿陷性黄土
Rollins, K.M. (1994)	0.3 (6 480)	湿陷性黄土
徐至钧 (1997)	0.37~0.41 (6 000)	爆破开山抛石
	0.43 (8 000)	填海夹淤泥土地基
Lukas, R.G. (1997)	0.5 (10 560)	冲积尾矿
马安刚 (2001)	0.35 (6 000)	湿陷性黄土

### 3.3 高能级强夯的施工参数

#### 3.3.1 夯锤参数

包括锤重, 锤形, 锤底面积, 排气孔的大小、位置、数量等; 组合锤应做好单件的连接, 夯锤的单位面积静压力宜为 40 kPa~80 kPa。如我国 8 000 kN·m 的高能级强夯的典型参数如下: 锤质为铸铁, 圆形, 锤底直径  $d = 2.52$  m, 面积 5 m<sup>2</sup>, 30 t×26.6 m 或 40 t×20 m, 夯点间距  $2d \sim 2.5d$ , 锤底单位面积静压力 60 kPa~80 kPa。

#### 3.3.2 夯击次数和停锤标准

夯击次数宜通过试夯确定, 其原则是使土体竖向压缩最大, 侧向挤出最小, 由夯沉量曲线或有效夯实系数来控制, 一般为 8 击~15 击, 施工中的控制标准按击数和最后两击平均夯沉量控制。对湿陷性黄土, 最后两击夯沉量不易控制, 工程中多采用夯坑深度超过 4 m 的标准<sup>[6]</sup>。当最后三击平均夯沉量小于 10 cm 或当地面发生明显隆起或起锤困难时, 则停止夯击。

#### 3.3.3 夯点间距与夯点布置

夯点间距宜通过试夯确定, 两遍成夯施工工艺, 主夯点间距为  $1.5d \sim 3d$  或大致等于预期的有效加固深度。夯点布置可根据建筑物基础类型确定, 应尽量布置在建筑物基础位置上, 多采用正三角形或正方形布置。

#### 3.3.4 间歇时间与检测时间

间歇时间取决于土的超静水压力消散时间, 一般为 2 周~4 周。对于含水量适宜的非饱和土土可连续进行施工。强夯后的地基物理学指标检测应在场地施工完成经时效后进行, 对粗粒土地基一般间隔时间 1~2 周; 对细粒土、粘性土则需孔压消散, 土触变恢复后进行, 一般 3~5 周, 否则不能准确反映加固效果。

## 4 高能级强夯施工中的几个问题

### 4.1 高能级强夯施工各遍夯击的控制标准

高能级强夯施工各遍夯击的控制标准宜根据场地地质条件的差异和处理要求不同而有所不同。如在某工程中, 其中大部分 8 000 kN·m 能量主夯点施工采用了夯击次数和贯入度相结合的控制标准, 但对曾遭水浸泡、含水量较大的区域, 主夯则采用夯击次数和夯坑深度相结合的控制标准。

### 4.2 高能级强夯施工工艺远较低能量强夯复杂

强夯工艺的选择对强夯效果影响很大。高能级强夯施工中, 工程协调配合工作量大, 地基处

理过程常需与土方回填、结构施工等交叉作业, 相互制约影响较大; 施工中夯点布置间距较大, 主夯坑深, 夯锤易向邻近夯坑倾斜, 以及含水量的变化都增加了高能级强夯施工工艺的复杂性。因此在三遍或四遍成夯工艺施工中, 主夯应采用隔行分次夯击方式, 复夯和单点夯可采用一次按序夯击方式, 满夯则可呈扇形搭接一次夯击完成, 这不仅完全保证了施工质量, 而且大大提高施工效率。

### 4.3 土体含水量对高能级强夯加固效果的影响

对大厚度非饱和土, 强夯加固效果对土体含水量的变化是较为敏感的<sup>[10]</sup>。强夯工艺和参数是通过试夯确定的, 而这些试验都是在某一特定的含水量下进行的。由于采用高能级强夯的工程多为大工程, 工期较长, 因此地基土的含水量变化较大, 会直接影响夯后地基土的效果。雨季施工, 如果土体含水量过高, 可能造成孔隙水难以排出, 形成软弹现象; 旱季强夯施工时, 如果土体含水量过低, 主夯夯坑浅, 很难达到加固要求; 同时, 夯坑深度也会随土体含水量逐渐增高而越来越深。一些工程因雨季造成的地基表层局部含水量过高, 结果导致夯实效果不佳。实践表明对湿陷性黄土地区强夯的最佳含水量为低于塑限 1%~3% 的含水量<sup>[11]</sup>。因此, 强夯施工要注意气候条件(如雨水、阳光等)和其他外来水对土体含水量的影响, 加强对土体含水量的测试, 及时修正强夯工艺与参数, 并做好场地的防雨排水措施, 如施工中辅以夯坑抽水、挖泥、晾晒、封闭夯坑等措施, 将降雨所造成的不利影响减小到最低程度。

### 4.4 高能级强夯机具的选择

高能级强夯锤重, 落距大, 形成的夯坑深, 夯击产生的振动强, 因此对强夯机械提出了很高的要求。大夯击能强夯施工机械的合理选用, 是强夯处理地基的关键所在。目前, 国内外强夯机具种类不多(详见表 3), 选用原则是既要满足工程要求, 又要降低工程费用。目前, 我国多采用机械式脱钩装置和人工挂钩, 效率低且不安全。国外强夯施工机械中有采用液压挂钩和自动脱钩装置的, 这样施工过程中人员无需进入夯击区, 既提高了施工效率, 又保证了人身安全<sup>[1]</sup>。因此, 研制新型的挂钩与脱钩装置, 将是强夯机械的一项重要的技术革新。

表 3 高能级强夯机械一览表

机具名称		落距	锤重	能级	有效加
中译名	英译名	H/m	M/kN	E/kN·m	固深度
腹带吊车	Crawler	10	100	1 000	≤6 m
	Crane	25 (20)	200	500 (400)	≤9 m
巨型吊车	Mega-machine	30	250	7 500	≤14 m
杭州重机 W200A 型	W200A	20	400	8 000	≤15 m
三角架起重	Tripod	40	400	16 000	≤20 m
特巨型吊车	Giga-machine	20	2 000	40 000	≤30 m

### 4.5 信息化施工管理要求

强夯加固是一种信息化的施工过程, 在每一阶段夯击结束后, 即对这一阶段的施工状况及加固效果进行调查, 并利用调查结果指导下阶段的夯击, 这种管理方法称为信息化施工管理<sup>[1]</sup>。由于大部分场地土质成分变化无序, 垂直及水平方向上差异很大, 均匀性很差。若强夯能级分区只考虑填土厚度或其它单一因素, 就无法进行综合性能级分区, 因此强夯设计只是一个原则性的普遍认识, 必须借助施工过程中的加固信息反馈。如对各夯点的夯沉量、击数、夯坑深度、夯坑填料成分、含水量变化及夯坑周围地面变形情况等诸方面监测以及夯后检测结果记录, 及时地、

反复地对强夯参数及施工工艺进行相应的修正与调整,才能满足强夯加固的技术要求,满足承载力特别是减少沉降量和变形均匀性的要求,从而取得较好的加固效果。例如,当施工中遇到地基不均匀,按原计划施工发现某部分地基加固效果不十分满意时,可对软弱部分进行补夯,促使这部分地基达到预定的加固效果,这就是信息化施工的实质。高能级强夯的施工还要求管理人员和操作人员具有较强的管理能力、较高的技术水平和丰富的操作经验。

## 5 高能级强夯发展和推广应用的建议

对加固深厚地基,特别是山区非均匀块石回填地基和抛石填海地基,必须施加大能量进行强夯处理,这就对高能级强夯的加固机理和施工机具提出了新的技术要求。

(1) 当强夯能量要求大于  $8\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  时,目前施工单位常用的  $50\text{ t}$  履带吊难以承受,因此施工机具的制约是高能级强夯技术发展的关键。所以应进行  $10\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  及以上的高能级强夯的开发和应用。

(2) 为了适应当前工程建设中重型、大型工程的需要和强夯法进入国际市场,应组织和开发  $10\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  及以上的高能级强夯专用设备,以及与之配套的新型挂钩和脱钩装置,并进行高能级强夯的试验与理论研究。目前  $10\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  的高能级强夯试验和  $16\,000\text{ kN}\cdot\text{m}\sim 200\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  的强夯专用机具的研制正在进行。

(3) 大力发展高能级强夯置换和置换后强夯技术。着重研究淤泥质软土中置换后强夯的理论计算、施工技术和施工工艺,以及强夯法和其它方法结合的综合处理技术,进一步扩大强夯法的使用范围。

(4) 高能级强夯施工工艺复杂,应加强强夯施工管理,首先组织试点工程推行信息化施工方法,通过总结经验逐步推广,以提高强夯处理的工程质量和降低工程造价。

### 参 考 文 献

- [1] 王铁宏主编. 全国重大工程项目地基处理工程实录. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998
- [2] M.P.Ganbin. Dynamic compaction. In: Ground engineering reference book. (ed.F.E.Bell.) Robert Hartnoll Ltd., Bodmin, Cornwall, 1987
- [3] L.Menard, Y.Broise. Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation. Ground Treatment by Deep Compaction. Telford Ltd. London, 1976
- [4] Gambin M.P. (1983). The Menard dynamic consolidation method of Nice Airport. In: *Proc. 8th European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engrg.* Vol.1, 231~234. Balkema Publishers
- [5] Slocombe, B.C. (1993). Dynamic compaction. In: *Ground Improvement* (ed. M.P.Moseley). 20~39. Published in the USA and Canada by CRC Press, Inc. London, 1993
- [6] Kyle M.Rollins, Ji-Hyoung Kim. U.S. experience with dynamic compaction of collapsible soils. 25~43. *In-Situ deep soil improvement*. ASCE. New York, 1994
- [7] R.G. Lukas. Delayed soil improvement after dynamic compaction. *Ground Improvement, Ground Reinforcement, Ground Treatment*. Published by the ASCE, 1997. 409~420
- [8] S.Hansbo. Dynamic consolidation of rockfill at uddevalla shipyard. In: *Proc. 9th. Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg.* Tokyo, 1977 (2), 241~246
- [9] Hendy M.S., Muir I.C. Experience of dynamic replacement on a 40m deep reclamation in Hong Kong. *Ground Improvement Geosystems*. Thomas Telford, London, 1997. 75~81
- [10] 苏冰. 洛阳石化总厂化纤工程  $4.6\text{ 万 m}^2$  地基强夯处理. *岩土工程学报*, 2001, 23 (2)
- [11] Kyle M.Rollins, Stan J.Jorgensen, Todd E.Ross. Optimum moisture content for dynamic compaction of collapsible soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 1998, 124 (8), 699~708