山东省工程建设标准

强夯地基处理技术规程

Technical Specification of Dynamic Consolidation to
Ground Treatment

DB37/T 5136 — 2019

住房和城乡建设部备案号：J××××× — 2019

主编单位：山 东 大 学

山东省机械施工有限公司

批准部门：山东省住房和城乡建设厅

山东省市场监督管理局

施行日期：2 0 1 9 年 5 月 1 日

中国建材工业出版社

2019 济南

山东省工程建设标准
强夯地基处理技术规程
DB37/T 5136—2019

*

出版：中国建材工业出版社

地址：北京市海淀区三里河路1号

邮政编码：100044

印刷：北京雁林吉兆印刷有限公司

开本：850mm×1168mm 1/32 印张：1.625 字数：40千字

2018年4月第1版 2018年4月第1次印刷

印数：1~500册 定价：30.00元

*

统一书号：155160·1596

版权所有 翻印必究

山东省住房和城乡建设厅
山东省市场监督管理局

鲁建标字〔2019〕8号

山东省住房和城乡建设厅
山东省市场监督管理局
关于发布山东省工程建设标准《强夯地基
处理技术规程》的通知

各市住房城乡建设局、市场监管局，各有关单位：

由山东大学和山东省机械施工有限公司主编的《强夯地基处理技术规程》，业经审定通过，批准为山东省工程建设标准，编号为DB37/T 5136—2019，现予以发布，自2019年5月1日起施行。

本标准由山东省住房和城乡建设厅负责管理，由山东大学负责具体技术内容的解释。

山东省住房和城乡建设厅
山东省市场监督管理局

2019年2月27日

前 言

本规程是根据山东省住房和城乡建设厅、山东省质量技术监督局《关于印发 2018 年第二批山东省工程建设标准制定、修订计划的通知》要求，由山东大学和山东省机械施工有限公司等组织成立编制组，经过广泛调查研究，依据国家和行业相关标准、规范，结合我省实际，编制了本规程。

本规程主要包括总则、术语和符号、基本规定、设计、施工、施工监测、质量检测和验收等内容，系统地对强夯施工技术做出了具体的技术要求和规定。

本规程由山东省住房和城乡建设厅负责管理，由山东大学负责具体内容的解释。

本规程在使用过程中，请各单位注意总结经验，积累资料，及时将修改意见寄送至山东省机械施工有限公司（地址：济南市槐荫区绿地中央广场 C-3 地块 A 座 18 楼，邮编：250000，联系电话：13805401529，邮箱：sdjs1960@163.com），以便今后修订。

主 编 单 位：山东大学

山东省机械施工有限公司

参 编 单 位：济南黄河路桥建设集团有限公司

潍坊市市政工程股份有限公司

青岛海德工程集团股份有限公司

山东百士基础工程有限公司

山东正元建设工程有限责任公司

主要起草人：姚占勇 周 冲 崔新壮 周广泉 任宗福

高遵斌 徐世立 崔瑞文 寇媛媛 姜正璟

陈明本 陈正阳 郑全明 何东林 韩 民

蒋红光	李家磊	卢 途	李宏伟	顾学军	
高风顺	孙永华	丁德利	袁培民	王 猛	
张文星	王文明	卢留英	盛承宝	张义强	
刘广庆	秦晓玉	郟钉堂	孙梦林	张占奎	
李玉福	郭传海	宗世晓	李志刚	薛永恒	
奉 建	许福强	杨明忠			
主要审查人：	宋义仲	刘俊岩	李连祥	樊祜传	马连仲
	盛根来	崔风仁	孙 杰	辛公锋	

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	4
3	基本规定	5
4	设计	6
4.1	一般规定	6
4.2	普通强夯	8
4.3	置换强夯	10
4.4	坑内深层强夯	11
4.5	降水强夯	11
5	施工	13
5.1	一般规定	13
5.2	施工场地准备	14
5.3	施工机具	14
5.4	施工作业	15
6	施工监测、质量检测和验收	19
6.1	施工监测	19
6.2	施工质量检测和验收	20
	本规程用词说明	21
	引用标准名录	22
	附：条文说明	23

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	4
3	Basic Requirement	5
4	Design	6
4.1	General Requirement	6
4.2	Dynamic Compaction	8
4.3	Dynamic Replacement	10
4.4	Down-hole Dynamic Compaction	11
4.5	Dewatering Dynamic Compaction	11
5	Construction	13
5.1	General Requirement	13
5.2	Preparation of Construction Site	14
5.3	Construction Machine	14
5.4	Construction Procedure	15
6	Construction Monitoring, Quality Test and Acceptance	19
6.1	Construction Monitoring	19
6.2	Construction Quality Test and Acceptance	20
	Explanation of Working in This Code	21
	Quoted Code	22
	Additional; Explanatory Note	23

1 总 则

1.0.1 为规范强夯地基处理的设计、施工和质量检测与验收，提高强夯地基处理技术应用水平，保证强夯地基处理的安全经济和工程质量，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于山东省内强夯地基处理的设计、施工和质量检测与验收。

1.0.3 强夯地基处理应符合因地制宜、就地取材、节约资源、保护环境的原则。

1.0.4 强夯地基处理工程除应符合本规程外，尚应符合现行国家和行业有关规范、标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 强夯地基处理 dynamic consolidation

为提高地基承载力，改变其变形性质或渗透性质而采取的用重型夯锤夯实和加固地基的方法。

2.1.2 强夯法 heavy tamping

反复将夯锤提到高处使其自由落下，给地基以冲击和振动能量，将地基土夯实的夯处理方法。

2.1.3 置换强夯法 dynamic replacement

在形成的夯坑内填入砂石等硬粒料，并反复夯填，使其形成密实墩体的夯处理方法。分为点式置换法和垫层置换法。

2.1.4 点式置换法 method of point substitution

直接在地表先夯出一定深度的夯坑，用装载机向夯坑内填料再夯，反复夯填，直至完成一个夯点的填料量和夯击次数的置换强夯法。

2.1.5 垫层置换法 method of undercourse substitution

考虑夯沉量及置换墩所需填料量，预先在基槽中换填一定厚度的粗颗粒填料垫层，然后在垫层上强夯的置换强夯法。

2.1.6 坑内深层强夯 deep dynamic compaction in pits

用柱型锤先在地面夯出较深的夯坑，然后向其下部填料，并反复夯填，对夯坑底部以下的土进行处理的方法。

2.1.7 降水强夯 dewatering dynamic compaction

对地基实施降水作业，将地下水位降至设计深度后再进行强夯施工的一种作业方法。

2.1.8 有效加固深度 effective reinforcement depth and influence depth

夯后地基强度或物理力学指标达到设计要求的深度。

2.1.9 单击夯击能 energy of single rammer

锤重与落距的乘积称为单击夯击能。

2.1.10 夯击次数 tamping times

对单个夯点连续或分遍施加的累计锤击数。

2.1.11 强夯遍数 number of dynamic compaction

采取隔行或隔点顺序分遍强夯的次数。

2.1.12 复夯遍数 times of ramming

对原夯点采取分遍强夯的次数。

2.1.13 单位面积平均夯击能 average ramming energy unit area

地基单位面积上接受的夯击能量总和。

2.1.14 饱和夯击能 saturated ramming energy

单击夯击能一定的条件下，增加夯击次数而加固深度不再增加或增加不明显时的夯击能。

2.1.15 布点间距 points setting spaces

在处理范围之内所布置夯点的相邻距离。

2.1.16 满夯 full tamping

点夯完成后，用低于点夯的能量对地基表层进行最终处理的措施。

2.1.17 平均夯沉量 settlement of dynamic compaction

强夯前、后场地平均高程之差。

2.1.18 锤底静压力 the pressure of hammer

锤重与夯锤底面积之比。

2.1.19 置换深度 replacement depth

形成置换墩体的深度。

2.1.20 扰动层 disturbance layer

满夯后地表层松散部分。

2.1.21 遍间隔时间 intervals of each time

两遍夯击之间的时间间隔。

2.1.22 休止期 resting phase

强夯施工结束后至开始检测的间隔时间。

2.1.23 主夯点及插夯点 main tamping point and inserting ram point

采取隔行或隔点顺序分遍强夯时，第一遍夯间距较大的夯点称为主夯点，位于主夯点之间的夯点称为插夯点。

2.2 符 号

- a —— 加固深度修正系数；
- E_{sp} —— 复合土层压缩模量；
- E_s —— 墩间土压缩模量；
- f_{spk} —— 置换强夯复合地基承载力特征值；
- f_{pk} —— 置换墩承载力特征值；
- f_{sk} —— 墩间土承载力特征值；
- H —— 夯锤落距；
- m —— 面积置换率；
- n —— 桩土应力比；
- W —— 夯锤质量。

3 基本规定

3.0.1 强夯法适用于处理碎石土、杂填土、素填土、砂土、粉土、低饱和度的黏性土、湿陷性黄土及黄河冲（淤）积成因的饱和粉土与黏土互层等地基。置换强夯法适用于处理饱和软黏土、粉土、淤泥质土等地基。坑内深层强夯适用于处理深填土地基。

3.0.2 强夯地基处理方案应根据所加固地基土质类型、周边环境条件、建筑物荷载压力、基础形式等提出如下技术要求：

- 1 处理范围。
- 2 有效加固深度。
- 3 夯后地基承载力特征值。
- 4 夯后地基土变形参数。
- 5 夯后地基均匀性及加固效果检测方法、数量等。

3.0.3 当强夯施工振动对邻近建（构）筑物、仪器设备以及施工中的工程结构等产生有害影响时，应评估对周边环境的影响程度，明确施工安全距离和减、隔振措施。必要时应设置振动监测点。

3.0.4 地表土软弱时，宜铺填一定厚度的粗颗粒材料垫层或采用低能量预夯。

3.0.5 对于杂填土等粗颗粒土地基，当存在长期渗水条件时，应评估渗水的潜蚀作用对地基稳定性的影响。

3.0.6 采用桩基的湿陷性黄土、填土、可液化土地基，可先期采用强夯预处理。

4 设计

4.1 一般规定

4.1.1 强夯加固地基的设计，应根据被加固地基土质条件和深度、基础形式和上部荷载对地基压力及变形的要求，确定夯后地基承载力特征值和加固深度。

4.1.2 应通过试夯确定强夯方案、工艺参数的适用性和处理效果，并根据试夯结果优化强夯设计方案和工艺参数等。试夯应遵循如下原则：

1 试夯区数量应根据建筑场地的复杂程度、建筑规模及建筑类型等确定。试夯区应具有代表性，其面积不宜少于 400m^2 和 4×4 排夯点。

2 宜采用不同的施工工艺参数方案进行试夯。

3 对于黄河冲（淤）积平原区域的可液化粉土、粉砂土、砂土地基，当地下水位较高、饱和度较大时，宜进行孔隙水压力、土体变形等原位监测，评价强夯时的振动液化程度，明确地基液化的临界地下水位，并决定是否采取降水措施，以及适宜的夯击能、夯击次数等工艺参数。

4 检测应设置休止期。

5 夯前与夯后的检测方法及数量宜相对应。

4.1.3 试夯检测结束后应提交以下成果：

1 确定处理后地基土承载力特征值、有效加固深度和变形指标。

2 优化单击夯击能、夯遍数、夯击次数、夯间距等施工工艺参数。

3 确定停夯标准及施工质量控制指标。

4 校核夯后场地的平均夯沉量或隆起量。

5 评价强夯施工振动、侧向挤压对周边建（构）筑物和环境的影响。确定工程的最小安全振动距离和减、隔振措施。

4.1.4 强夯地基的变形计算，应符合《建筑地基基础设计规范》（GB 50007）的有关规定。夯后地基有效加固深度内土的压缩模量，应通过原位测试或土工试验确定。当受力层范围内存在软弱下卧层时，尚应验算下卧层的地基承载力和变形。可根据置换墩材料的压力扩散角计算传至墩下土层的附加应力，并计算置换强夯墩下土体的变形。

4.1.5 置换强夯地基承载力应按复合地基评价，墩与墩间土的承载力可分别通过现场静载荷试验确定。

4.1.6 置换强夯复合地基承载力可按下式计算：

$$f_{\text{spk}} = mf_{\text{pk}} + (1 - m)f_{\text{sk}} \quad (4.1.6)$$

式中： f_{spk} ——置换强夯复合地基承载力特征值（kPa）；

f_{pk} ——置换墩承载力特征值（kPa）；

f_{sk} ——墩间土承载力特征值（kPa）；

m ——面积置换率（%）。

4.1.7 置换强夯复合土层的压缩模量可按下式计算：

$$E_{\text{sp}} = [1 + m(n - 1)]E_{\text{s}} \quad (4.1.7)$$

式中： E_{sp} ——复合土层压缩模量（MPa）；

E_{s} ——墩间土压缩模量（MPa），宜通过现场试验确定，亦可取夯前天然地基土压缩模量；

m ——面积置换率（%），置换墩计算直径可取夯锤直径的1.1~1.2倍；

n ——墩土应力比，可由检测试验确定。当无实测数据时，对黏性土可取2~4，对粉土可取1.5~3，原状土强度低时取大值，原状土强度高时取小值。

4.1.8 强夯夯击能可分为4个能级：低能级小于4000kN·m；中能级为4000~6000kN·m；高能级为6000~8000kN·m；超高能级大于8000kN·m。

4.1.9 单体工程基础下的填土地基厚度差异不大时，可通过调

整夯击次数控制夯后地基的均匀性；当厚度差异较大时，应分区块采用不同的单击夯击能量。

4.1.10 对于厚度大于 8m 的**高填方地基**，宜采用分层强夯法处理。可根据采用的单击夯击能，按每层厚度 4~8m 控制。下层地基夯后检测合格后，方可进行上层的回填和强夯。

4.2 普通强夯

4.2.1 单击夯击能宜根据试夯或试验性施工确定的参数选取，其他情况宜按表 4.2.1 推荐的参数选择；满夯能量宜为点夯能量的 1/2~1/3。

表 4.2.1 强夯法的有效加固深度 (m)

单击夯击能 (kN·m)	碎石土、砂土等 粗颗粒土	粉土、黏性土、湿陷性黄土 等细颗粒土	最后两击平均夯 沉量 (cm)
1000	4.0~5.0	3.0~4.0	≤5.0
2000	5.0~6.0	4.0~5.0	≤5.0
3000	6.0~7.0	5.0~6.0	≤5.0
4000	7.0~8.0	6.0~7.0	≤5.0
5000	8.0~8.5	7.0~7.5	≤10.0
6000	8.5~9.0	7.5~8.0	≤10.0
8000	9.0~9.5	8.0~8.5	≤10.0
10000	9.5~10.0	8.5~9.0	≤20.0
12000	10.0~11.0	9.0~10.0	≤20.0

4.2.2 点夯的夯击次数，应依据现场试夯得到的夯击次数与夯沉量关系曲线，按照表 4.2.1 推荐的最后两击平均夯沉量确定，并控制夯坑周围的土体不发生过大的隆起。易液化的粉、砂土地基，以及埋深较浅、厚度较大、饱和度偏高的黏土地基，应通过现场试验确定夯击次数。

4.2.3 强夯遍数应根据地基土的物理、力学性质以及地基承载力要求确定。可按 2~4 遍的点夯方式施工，即按主夯点、次夯点及插夯点的方式分遍施工；对于饱和度较高、渗透性较差的细颗粒土，应采用原点复夯的分遍方式施工；对于厚度不大的粗颗粒土及非饱和黏性土等，可采用一遍点夯工艺施工。

满夯遍数宜为 1~2 遍，单点夯 2~4 击，并使锤印互相叠压不少于 1/3。当点夯能量较高且夯坑较深时，应满夯 2 遍，且后一遍满夯的能量和击数宜低于前遍。当点夯能量不大、夯坑较浅时，可满夯 1 遍。

4.2.4 夯点可根据基础底面形状布置。对于面积较大的片筏基础、路基等，可按正三角形或正方形布置夯点；办公楼、住宅建筑等，可根据承重墙位置布置夯点，并应保证承重墙以及纵、横墙交汇处布有夯点；工业厂房可按柱网设置夯击点。

普通强夯布点间距宜为锤径的 1.5~2.0 倍，低能级或锤径小时宜取小值，高能级及锤径大时宜取大值。

4.2.5 两遍夯击之间，应有一定的遍间隔时间。遍间隔时间应根据强夯地基的超静孔隙水压力的消散情况确定。当缺少实测条件时，饱和度较高的黏性土遍间隔时间不宜少于 21d；非饱和黏性土、湿陷性黄土不宜少于 7d；黄河冲（淤）积粉土不宜少于 2d；渗透性较好的碎石土、砂土等，可连续夯击。

4.2.6 强夯处理范围应大于建筑物基础范围。对于正常固结的地基土，每边超出基础外缘的宽度应不小于 3m；可液化土地基不小于 5m；回填厚度较大的填土，每边超出基础外缘的宽度宜为基底下设计处理深度的 1/2~2/3。

4.2.7 夯后应在设计基底标高以上留有一定厚度的扰动层（保护层）。黏性土地基的扰动层厚度一般为 20cm 左右。对于碎石土、杂填土等粗颗粒土的地基，宜不留扰动层。

4.2.8 场地平均夯沉量应通过试夯或根据施工经验确定。场地夯前高程应根据平均夯沉量以及夯后扰动层（保护层）厚度确定。

4.3 置换强夯

4.3.1 置换强夯地基可根据土层条件和基础形式选择采用点式置换法或垫层置换法。点式置换法适用于车间、地下车库的独立基础等。垫层置换法适用于大面积的筏板基础或路基工程。

4.3.2 置换墩的深度设计应根据土质条件确定，除厚层饱和粉土外，应穿透软土层达到较硬土层上，深度不宜超过 10m。

4.3.3 单击夯击能应根据置换墩的设计深度并由现场试验确定，不宜低于 $4000\text{kN}\cdot\text{m}$ 。宜采用柱型锤，直径为 1~2m，锤底静压力值为 100~200kPa。

4.3.4 夯击次数应通过试夯确定，并应满足下列条件：

1 墩底应穿透软弱土层，且达到设计墩长。

2 累计夯坑深度应达到设计墩长的 1.5~2.0 倍。

3 置换强夯施工应以控制锤击次数为主、控制最后两击的平均夯沉量为辅，最后两击平均夯沉量宜试夯确定。

4.3.5 筏板基础以及路基工程，宜采用等边三角形或正方形布置墩位；对于独立基础或条形基础宜根据基础形状与宽度做相应布置。

4.3.6 置换墩间距应根据面积置换率确定。满堂布置时宜取夯锤直径的 2 倍；独立基础或条形基础宜取夯锤直径的 1.5 倍；置换墩的计算直径宜取夯锤直径的 1.1~1.2 倍。置换强夯地基的加固范围应符合本规程 4.2.6 条的规定。

4.3.7 墩体材料宜采用级配良好的块石、碎石、建筑渣土、矿渣等质地坚硬、性能稳定的粗颗粒材料，大于 300mm 粒径的颗粒含量不宜大于填料总重的 30%。填料中的含土量不宜大于填料总重 20%；建筑渣土中有机物的含量不宜超过 5%。当采用工业矿废渣时，污染物含量应符合《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》(GB 18599) 的要求。

4.3.8 点式置换满夯前，应在场地上铺设一层与墩体材料相同、厚度不小于 500mm 的垫层，垫层材料的粒径不宜大于 100mm；

垫层置换不应使墩间土击穿垫层出露地面，宜保持墩间垫层厚度不小于 500mm。

4.4 坑内深层强夯

4.4.1 坑内深层强夯的单击夯击能和加固深度应根据试夯确定。加固深度不宜大于 16m。初步估算加固深度时，可按表 4.2.1 推荐的加固深度加上夯坑底起夯面以上的夯坑深度计算。宜取中、高级夯击能。

4.4.2 夯锤参数可参照本规程 4.3.3 条的要求选用。

4.4.3 布点间距可按 2.5 倍左右的夯锤直径取值。夯点布置形式执行本规程第 4.2.4 条的规定。

4.4.4 单个夯点的总夯击次数由预夯成坑、坑底夯击和填坑夯击的次数组成，一般不低于 15 击，最后两击平均夯沉量应由试夯确定或参照表 4.2.1 的规定。

4.4.5 坑内填料可采用现场的干土或灰土、水泥土、水泥粉煤灰土等，亦可采用本规程第 4.3.7 条规定的粗颗粒填料。采用现场土时，应按普通强夯地基的规定检测；采用有胶结强度的材料或粗颗粒材料时，应按置换强夯地基检测。

4.4.6 应满夯 2 遍。第 1 遍夯击能宜为主夯点的 1/2，夯击次数宜为 3~4 击；第 2 遍夯击能宜为主夯点的 1/3，夯击次数宜为 2~3 击。

4.5 降水强夯

4.5.1 场地地下水位高，影响施工或夯实效果时，应采取降水措施。降水深度和强夯施工工艺参数应根据现场试夯确定。

4.5.2 降水设计应符合相关规范的规定。应根据处理面积、深度和降水设计划分为若干独立的降水系统。降水系统可采用轻型井点或管井降水形式，对于渗透系数较大的砂土、粉土亦可采取明排降水。

4.5.3 采用轻型井点降水时，井点管的布置应兼顾夯点的布置

距离，保证夯击时不对井点造成破坏，并不妨碍强夯机的运行。

4.5.4 降水强夯宜采用低能级、少击数、多遍夯的工艺，按照先轻后重、逐渐加大能量的原则进行施工。

5 施 工

5.1 一 般 规 定

5.1.1 施工前应取得下列资料：

- 1 强夯地基处理设计文件及图纸会审记录。
- 2 主要施工机具及其配套设备的技术性能资料。
- 3 强夯试验资料，当地有关强夯施工的经验资料。
- 4 施工前应向施工人员进行技术、质量交底。

5.1.2 施工前应完成下列工作：

- 1 强夯地基处理的施工组织设计。
- 2 对黏性土地基、湿陷性黄土地基，必要时测定地基处理深度内土的含水量。

3 详细了解填土的成分、构成、级配和土石比等；开展颗粒分析、固体体积率、击实等必要的试验，确定填土粗颗粒料的控制粒径和级配，以及细颗粒料的最大干密度和最佳含水量，为强夯质量控制提供依据。

4 对山区地基，应了解地下径流、泉水和裂隙水的出露情况，并做好记录，标出坐标位置。

5 设置测量控制网，建立现场坐标平面控制点和高程控制点。

6 检查夯锤质量和落距。

5.1.3 当强夯区域周边有建（构）筑物时，强夯施工前应评估其影响程度并确定安全距离。强夯振动安全距离可参照国家标准《建筑工程容许振动标准》（GB 50868）确定。必要时应采取设隔振沟等措施减振，隔振沟的深度一般为2~3m，长度应大于被保护建筑物。必要时进行强夯振动监测。

5.1.4 当强夯施工对人工边坡、海堤、挡墙等建（构）筑物可

能产生侧向挤压影响时，应通过现场深层水平位移测试确定安全距离。

5.1.5 施工中必须监控每个夯点的最后两击平均夯沉量，控制标准应符合表 4.2.1 的规定。

5.1.6 强夯施工应遵循双控原则，既要控制夯击次数达到设计要求，又要控制最后两击平均沉降量满足表 4.2.1 的规定。当夯击次数达到设计要求而夯点的最后两击平均沉降量不满足表 4.2.1 的规定时，应适当增加 2~3 击的夯击次数。采用柱型夯锤施工时，最后两击平均沉降量标准可通过试夯适当放宽要求。

5.1.7 饱和度较高的黏性土地基，强夯后严禁轮式车辆碾压，以防止产生“橡皮土”；雨期施工时，夯后地基不得发生“泡槽”情况；冬期夯后地基暂时不施工时，宜铺填一定厚度的**虚土防冻或覆盖**。施工基础垫层时应先清除夯后地基的保护层。

5.2 施工场地准备

5.2.1 必须对强夯场地和周边环境进行调（探）查，查明场地内及周边地上、地下建（构）筑物和各种地下管线的位置及埋深等，并予以清除或采取必要的保护措施。

5.2.2 宜根据经验预估或通过试夯确定场地平均夯沉量（或抬升量），按设计基底高程和预留平均夯沉量进行土方平整作业。施工场地平整前应清除地表的耕植土、污染土、有机物质等。**平整后的场地应具有足够的承载能力，能满足机械作业的要求。**

5.2.3 当地表土较松散不能承受强夯机械的重量时，宜铺设一定厚度的**粗骨料垫层**，或采取预压、低能量预夯等处理措施。

5.2.4 应用 20m×20m 方格网测量夯前场地标高。

5.2.5 施工现场可根据需要设置临时排水系统。

5.3 施工机具

5.3.1 强夯锤应采用铸钢制造，一般底面为圆形，重 10~60t。

普通强夯锤一般对称设置 4 个贯通的排气孔，孔径 300～400mm；**夯锤**普通夯锤直径为 2～3m；夯锤底的静压力值一般为 25～40kPa，地基土颗粒越粗，**锤底静压力越大**。置换强夯或**孔内深层强夯的**夯锤直径一般为 1～2m，不设排气孔，其锤底静压力值可取 100～200kPa。

5.3.2 强夯施工应采用履带式起重机或其他专用设备。应根据所需夯击能量选用合适的起重机，其有效起吊高度和回转半径应满足施工要求。当施工高能级强夯时，起重机应配置龙门架。

5.3.3 采用的脱钩装置必须可靠、灵活，有足够的强度和耐用性。脱钩时不得发生锤与钩不脱离现象。

5.3.4 应根据工程规模，配备相应型号与数量的推土机。置换强夯或**孔内深层强夯应**配备装载机填料。

5.4 施工作业

5.4.1 普通强夯按下列步骤施工：

1 清理并平整施工场地至起夯面高程，标出第一遍夯点位置。

2 强夯机就位，夯锤置于夯点位置，测量夯前锤顶高程。

3 将夯锤起吊到预定高度，开启脱钩装置，待夯锤脱钩自由下落后，放下吊钩，测量锤顶高程。若发生夯锤歪斜情况时，应及时将夯坑底面整平。

4 按设计规定的夯击次数及最后两击沉降量标准完成单个夯点的夯击。当夯坑较深提锤困难，但无明显隆起，且尚未达到控制标准时，可将夯坑推平后继续夯击。

5 换夯点，重复前述步骤，完成第一遍全部夯点的夯击。

6 用推土机将夯坑推平，并测量场地高程。

7 在满足遍间隔时间后，按上述步骤逐次完成全部夯击遍数。

8 用低能量满夯，将场地表层松土夯实，并测量夯后场地高程。

5.4.2 点式置换强夯按下列步骤施工：

- 1 清理并平整施工场地至夯前高程，标出夯点位置。
- 2 强夯机就位，夯锤置于夯点位置，测量夯前锤顶高程。
- 3 夯击并逐击记录夯坑深度。当夯坑达到一定深度或发生起锤困难时停夯，向夯坑内填料后再夯，重复夯填直至满足设计的夯击次数、填料量及停锤标准，完成一个墩体的夯击。当夯点周边软土隆起挤出影响施工时，**应随时进行清理并在夯点周围换填骨料后继续施工。**

4 换夯点，重复前述步骤，按由内而外的原则完成全部夯点的施工。

5 推平场地，铺设 500mm 厚垫层，换用普通夯锤进行低能量满夯，将场地表层松土夯实，并测量夯后场地高程。

5.4.3 垫层置换强夯按下列步骤施工：

1 根据置换深度和面积置换率及地基土的有效压实率估算垫层厚度，并预留平均夯沉量。根据确定的垫层厚度，将设计基底高程以下部分的土层挖填后，铺填粗骨料垫层至夯前高程。

2 测放夯点位置，强夯机就位并在垫层上实施夯击，记录夯击次数，直至满足夯点的设计夯击次数及停锤标准。

3 将夯坑周围的垫层粗骨料推入夯坑，整平场地。

4 测放第二遍夯点位置，重复前述步骤，实施第二遍点夯，直至满足夯点的设计夯击次数及停锤标准。当夯点周边挤出软土影响施工时，应随时清理，并换**填骨料**后继续施工。

5 推平场地，换用普通夯锤进行低能量满夯，将场地表层松土夯实，并测量夯后场地高程。

5.4.4 坑内深层强夯按下列步骤施工：

1 清理并平整施工场地至起夯面高程，标出夯点位置。

2 强夯机就位，测量夯前锤顶高程并实施夯击。记录夯击次数，使夯坑达到预定深度。

3 向夯坑内填料，填料高度不超过 1.5 倍的锤径。然后在

夯坑内继续夯击，将填料夯击至原夯坑深度。

4 重复前述步骤，反复夯填至停锤标准，完成单个夯点的坑内夯击。

5 分层夯填至地表起夯面，完成单个夯点的全部夯击次数。

6 转移夯机至下一个夯点，重复前述步骤，完成全部点夯。

7 推平场地，换用普通夯锤进行低能量满夯，并测量夯后场地高程。

5.4.5 降水强夯按下列步骤施工：

1 平整施工场地至起夯面高程，按降水设计施工降水井点。

2 实施降水、测量水位达到设计要求后强夯机就位。

3 按强夯施工设计的工艺参数实施点夯及满夯。

4 拔除降水井管，满足规定的间隔时间后进行夯后检测。

5.4.6 冬、雨期施工应符合下列要求：

1 冬期施工地表有较厚冻层时，应适当增加夯击次数击穿冻土层。降雪后应及时清理作业面和夯坑中的积雪，避免将冰雪夯入地基土中。

2 冬期施工推填夯坑时应将较大的冻土块推出强夯区域，填入夯坑中冻土块的粒径和含量应符合《建筑工程冬期施工规程》(JGJ 104)的有关规定要求。

3 冬期施工平整夯坑后应及时满夯，且满夯能量和击数应适当提高；当气温较低不能及时满夯时，宜采取防冻措施；地表冻结层较厚时，不宜进行满夯施工。

4 雨期强夯施工，应在基坑或强夯区域四周设置挡水土坝或土埂，以防场外雨水倒灌。整个强夯施工面应做成一定的排水坡度，边缘应挖排水沟，当排水沟的水无法直接排入周边排水系统时，应在强夯施工面边缘设置集水井，集水井应低于排水沟并设潜水泵，降雨时及时抽排水。

5 雨期强夯施工面积不大时，可采取防雨覆盖措施。防雨布之间应搭接严密，防止雨水渗漏。

6 雨季强夯施工应及时满夯；下雨前未填平的夯坑，雨后

应及时将坑内积水排净，待充分晾晒后再施工；下雨前已填平夯坑而未及时满夯时，雨后必须将夯坑内湿土挖除换填后方可满夯。

6 施工监测、质量检测 and 验收

6.1 施工监测

6.1.1 施工过程中应对夯点定位进行复核，夯后检查夯坑位置，发现偏差或漏夯应及时纠正。

6.1.2 应检查、记录如下各项施工参数：各夯点每击夯沉量、夯击次数、累计夯坑沉降量、夯击遍数、最后两击平均夯沉量、夯坑周边地面隆起值、夯坑置换料填量、夯击范围、场区平均夯沉量等。

6.1.3 强夯地基施工质量检查标准应符合表 6.1.3 的规定。

表 6.1.3 强夯地基施工质量检查标准

项	序	检测项目	允许值或允许偏差		检测方法
			单位	数值	
主控项目	1	地基承载力	不小于设计值		静载试验
	2	处理后地基土的强度	不小于设计值		原位测试
	3	变形指标	设计值		原位测试
一般项目	1	夯锤落距	mm	±300	钢索设标志
	2	夯锤质量	kg	±100	称重
	3	夯击遍数	不小于设计值		计数法
	4	夯击顺序	设计要求		检查施工记录
	5	夯击数	不小于设计值		计数法
	6	夯点位置	mm	±500	用钢尺量
	7	夯击范围（超出基础范围距离）	设计要求		用钢尺量
	8	前后两遍间隙时间	设计值		检查施工记录
	9	最后两击平均夯沉量	设计值		水准测量
	10	场地平整度	mm	±100	水准测量

6.2 质量检测和验收

6.2.1 强夯处理后地基承载力的检测应待满足休止期后方可进行。碎石土、建筑渣土和砂土等粗颗粒土地基的休止期宜为 7d；非饱和的一般黏性土、湿陷性土、粉土地基的休止期宜为 14d；饱和软黏土地基的休止期不宜少于 28d。置换强夯地基的休止期宜为 21~28d。

6.2.2 强夯处理后地基的竣工验收，承载力检验应根据静载荷试验、其他原位测试和室内土工试验等方法综合确定，检测方法不应少于两种。夯后地基承载力和加固深度必须满足设计要求，当不满足要求时应采取补夯或其他方法进一步处理。置换强夯后的地基竣工验收，除应采用单墩静载荷试验进行承载力检验外，尚应采用超重型或重型圆锥动力触探等有效手段查明置换墩的着底情况，以及密度随深度的变化情况。

6.2.3 夯后地基承载力、加固深度和加固均匀性检验应符合下列规定：

1 普通强夯地基静载荷试验检测点的数量，每单位工程不应少于 3 点，且每 300m^2 不应少于 1 点，超过 3000m^2 部分每 500m^2 不应少于 1 点。置换强夯地基单墩的静载荷试验数量不应少于墩点数的 1%，且不应少于 3 点。

2 强夯地基加固深度和均匀性检验，可采用动力触探、标准贯入试验、静力触探试验等原位检测，以及室内土工试验检验。对于简单场地上的一般建筑物地基，每 400m^2 不少于 1 个检验点，且总数不少于 3 点；对于复杂场地或重要建筑地基，每 300m^2 不少于 1 个检验点，且总数不少于 3 点；置换墩的检测点数量不应少于总墩点数的 3%，且总数不应少于 3 点。检测深度应大于强夯有效加固深度。

6.2.4 检测点位置应结合建筑物轮廓和轴线均匀、对称布置。非建筑物强夯地基的检测数量应按相关规范执行。

6.2.5 降水强夯地基的检测应在施工结束、停止降水且水位回升后进行。

本规程用词说明

- 1 对执行规程条文严格程度的用词采用以下写法：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的用词：
正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。
 - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：
正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：
正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”。
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词：
采用“可”。

2 条文中应按指定的其他有关标准、规范的规定执行，其写法为“应按……执行”或“应符合……的要求（或规定）”。

如非必须按指定的其他有关标准、规范的规定执行，其写法为“可参照……”。

引用标准名录

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- 1 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 2 《湿陷性黄土地区建筑规范》GB 50025
- 3 《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202
- 4 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 5 《建筑工程容许振动标准》GB 50868
- 6 《建筑地基基础工程施工规范》GB 51004
- 7 《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》
GB 18599
- 8 《建筑施工组织设计规范》GB/T 50502
- 9 《复合地基技术规范》GB/T 50783
- 10 《建筑地基处理技术规范》JGJ 79
- 11 《建筑地基检测技术规范》JGJ 340
- 12 《建筑工程冬期施工规程》JGJ 104
- 13 《强夯地基处理技术规程》CECS 279

山东省工程建设标准

强夯地基处理技术规程

DB37/T 5136—2019

条文说明

目 次

3	基本规定	25
4	设计	27
4.1	一般规定	27
4.2	普通强夯	30
4.3	置换强夯	34
4.4	坑内深层强夯	36
4.5	降水强夯	37
5	施工	40
5.1	一般规定	40
5.3	施工机具	41
5.4	施工作业	41
6	施工监测、质量检测和验收	43
6.2	质量检测和验收	43

3 基本规定

3.0.1 根据强夯动力密实加固原理，非饱和黏土或粗颗粒土在夯锤冲击力作用下结构破坏，颗粒重新排列，孔隙体积减小，土体得到密实，其夯实过程就是土中气相被挤出的过程。对这类土，基本不存在孔隙水压力消散等问题，工艺简便、强夯效果好。细颗粒饱和黏性土中存在微小气泡和孔隙水，在强夯冲击力作用下，孔隙水压力升高、地基土发生液化，使部分细颗粒土的薄膜水变为自由水，土的透水性增大。经过时效孔隙水压力消散，土的触变性恢复，强度提高。但在长期工程实践中发现，即使在饱和软黏土地基中设置竖向排水体，其加固效果也不理想。为改善饱和软黏土地基的强夯效果，国内曾有人提出了“填料夯”的施工方法。1990年，山东省机械施工有限公司结合山东禹城水泥厂新建水泥生产线强夯工程，在国内首先提出了“置换强夯复合地基”概念，采用1.5m直径夯锤、3000kN·m夯击能量和建筑渣土，成功开发了置换强夯施工工艺，有效解决了饱和软黏土地基强夯加固的技术难题，极大地扩展了强夯应用范围。

随着深厚填土地基开发利用需求的不断增加，又提出坑内深层强夯加固方法，主要是在单击夯击能提高受限情况下，解决增大强夯加固深度的问题。

3.0.2 强夯加固地基主要技术要求应由设计单位提出。施工单位据此和工程地质勘察报告，提出强夯施工方案，确定各项施工工艺参数。设计单位亦可直接提出强夯施工各项工艺参数。

3.0.3 强夯振动会对周边环境产生一定的影响，因此施工前应详细了解强夯周边的环境情况，包括周边建（构）筑物距离、结构、层高，场地高程及地层情况，建（构）筑物或仪器设备的允

许安全振动速度等。

强夯引起的振动是一种瞬时型的点源振动，振动频率约 6~40Hz。振动速度峰值的持续时间较短，地面振动波衰减迅速，其波形不存在叠加问题。同时这种地表振动的强度随着与夯点距离的增加衰减明显。在确定安全距离时应考虑振动速度、振动持续时间以及建筑物动力特性三个因素，同时也不能忽视夯击波的传播介质——施工现场的土质情况，以及所实施单击夯击能的大小。工程中应依据《建筑工程容许振动标准》（GB 50868），根据保护对象类别在不同振动频率条件下的安全允许振动速度，确定地面安全振动距离。根据工程实践，在夯点与被保护建（构）筑物之间设置隔振沟，可起到明显的降振效果。

3.0.4 软弱地表土承载力不足，不仅影响强夯机的正常运行，而且影响强夯效果。铺填一定厚度的粗颗粒垫层材料，可改善强夯机的运行条件并相对降低地下水位。有时采用低能量预夯除了改善强夯机的运行条件外，还可提高第一遍点夯的锤击次数。

3.0.5 杂填土等粗颗粒土的强夯地基，由于其孔隙率较大、渗透性好，当地基或周边有长期的渗流水源时，会对地基产生一定的潜蚀作用，影响地基强度与稳定性，对评估渗水的潜蚀作用进行评估是必要的。

3.0.6 对湿陷性黄土、欠固结填土地基、可液化土地基，采用强夯先期处理的目的是减轻或消除湿陷、振陷、液化等对桩基产生的有害负摩擦力问题，同时可解决填土地基中施工钻孔灌注桩的塌孔等问题。

4 设 计

4.1 一 般 规 定

4.1.1 夯后地基承载力特征值和加固深度是强夯施工设计的两个主要指标。夯后地基承载力大小主要取决于被夯地基土的性质。碎石土、中粗砂或建筑渣土等粗颗粒土，夯后地基承载力特征值可达 300kPa 左右，其中级配较好的碎石土地基承载力可达 400kPa 以上，压缩模量可达 40MPa。非饱和黏性土地基承载力夯后亦可达到 200kPa 左右。但对于细颗粒饱和黏性土，夯后地基强度提高有限且强度增长缓慢。因此，单击夯击能高低与夯后地基的承载力不成正比例关系。

加固深度主要取决于单击夯击能，要求的加固深度越大所需单击夯击能越高。当单击夯击能和夯击次数一定时，粗颗粒土地基的加固深度比细颗粒土地基大；填土地基比正常固结土地基的加固深度大；对于可液化土，消除液化的深度大于加固深度。

4.1.2 由于地基条件的复杂性，为优化地基强夯加固方案，合理确定相关工艺及其参数，评价强夯加固效果，施工前的试夯是十分必要的。在有经验的地区，当地质条件和设计要求类同时，可不进行专门试夯，直接采用类似条件下成熟的施工工艺和参数。

1 试夯区的数量应考虑工程规模、地基复杂程度、建筑类型等因素确定。工程实践表明，单点夯和群夯的效果有差异，考虑相邻夯点间的“边界效应”，**要求试**夯区的面积不宜小于 400m^2 ，且夯点不宜少于 4×4 排。

2 对于地质条件基本相同的场地，应采取不同的夯击工艺和参数组合方案，通过试夯后地基加固效果的对比，提出最优方案。

3 黄河冲（淤）积平原区域的粉土、粉细砂土地基，当地下水位较高、饱和度较大时，夯击易产生严重的液化问题，影响施工和加固效果。试夯时宜增设原位监测项目，观测记录孔隙水压力随夯击增加和消散情况，评价地基液化程度。据此确定是否采取降水措施，并调整和确定强夯施工方案。

4 饱和软黏土具有显著的触变性，其夯后孔隙水压力消散较慢，夯后必须设置合理的休止期，使地基土强度恢复到较为稳定的水平之后再行进行地基检测，以合理评价地基加固效果。

5 夯前与夯后的检测方法与数量相对应时，能够更合理地对比反映地基的加固效果。

4.1.3 试夯结束后，应根据不同土质条件确定时效时间，检测试夯加固效果。应对各试夯区的夯点和夯间沿深度进行原位测试和室内土工试验，对比夯前、夯后各项物理力学性质指标沿深度的变化情况，提出合理的强夯施工工艺参数和质量控制标准等。

1 试夯地基承载力的检测应采用浅层静载荷板试验方法。加固深度和地基均匀性检测采用标准贯入（一般黏性土和素填土）和重型动力触探（粗粒土、杂填土等）等方法。对于湿陷性黄土的湿陷性指标检测，应采用坑探取土的方法进行室内土工试验。

2 试夯时应观测、记录、分析各夯点的每击夯沉量、最后两击平均夯沉量、累计夯沉量（夯坑深度）、地面隆起量、相邻夯坑的侧挤情况、夯后地面平均下沉量（置换强夯应测量场地隆起量）。绘制夯击次数与累计夯沉量 $N-S$ 关系曲线，进行隆起、侧挤估算，合理确定饱和夯击能。试夯后应确定的强夯参数包括：单击夯击能量（夯锤质量和落距）、锤底静压力、单点夯击次数和夯击遍数、布点间距及布点形式、起夯面高程、达到饱和夯击能的场区平均夯沉量、最后两击平均夯沉量（停锤标准）、遍间隔时间等。应通过强夯加固效果对比，提出施工检测的质量控制手段和直接检测的技术指标，为正式大面积施工确定工艺参数。

3 因各类地基土在水平和垂直方向上厚度不同，同时地基土的组成和性质也有差异，通过试夯提出停锤控制标准，能最大程度地调整夯后地基的均匀性。

4 夯后场地的平均夯沉量或隆起量反映了地基土的有效压实程度，通过试夯可修正夯前场地高程和有关参数。

5 应通过强夯振动观测，绘制单点夯击数与地面振动加速度关系曲线、振动速度曲线，分析振动衰减规律，评价减振效果，提出工程的最小安全振动距离和减振措施。目前常用的降振措施主要是在强夯作业区与保护区之间开挖隔振沟（为保持边坡稳定常回填碎石），以减小地面振动波的强度，起到降振效果。隔振沟越深，降振效果就越明显，但同时也增加了隔振沟开挖的难度和工程量。近年来，山东大学开发了一种隔振新技术，其方法是根据振动控制标准，在强夯作业区与保护区之间地基土中插入一定深度的新型隔振板，施工效率高，隔振效果明显，可以实现强夯的深部隔振，经济高效。隔振沟的长度、深度对于降振效果也具有重要影响，适宜的隔振长度、深度与要求的振动控制标准、隔振材料、瑞利波波长、隔振沟结构等有关。依据经验，当隔振沟深度达到基础底部 3~4 倍瑞利波波长时能得到较好的隔振效果；隔振沟长度一般超出被保护结构两侧 10m 左右为宜。

4.1.4 由于强夯地基属于浅层加固，当加固深度以下存在软弱下卧层时，应按有关规定验算下卧层的地基承载力和变形。置换强夯地基的主要变形发生在置换深度以内，当墩的长度较小或小于墩径 2 倍时，应验算下卧土层的变形。

4.1.6 目前工程中采用的置换夯锤直径一般为 1.0~2.0m，如果采用单墩复合地基，试验难度较大且造价高。多年的工程实践表明，对置换墩进行静载荷试验，然后利用复合地基的经验公式来估算承载力，可以满足设计使用要求。

4.1.9 填土地基的厚度不同，所需要的夯击总能量也不相同。当单体工程基础下的填土厚度差异小于 1.0m 时，对较厚区域采取增加夯击次数的措施，可以保证夯后地基的差异沉降**满足要**

求。当填土厚度差异超过 1.0m 时，应对较厚区域采取较大的单击夯击能量处理，且宜从厚度大的区域向厚度小的区域顺序施工。

4.1.10 单击能量与加固深度不成正比例关系。4000kN·m 能量以内，夯击能每提高 1000kN·m，加固深度可增加 1m；超过 4000kN·m 能量以后，夯击能每提高 1000kN·m，加固深度仅增加 0.5m。从其加固机理可知，强夯是竖向加固的，越到下部加固效果越差。因此对于高填方地基应采用分层强夯。采用 3000kN·m、4000kN·m、6000kN·m 夯击能量时，分层的厚度可分别按 5m、6m 和 7~8m 控制。

4.2 普通强夯

4.2.1 大量试验研究和工程实测资料表明，在土质和单击夯击能一定的条件下，地基强夯加固深度是有限的。要增大地基加固深度，就必须提高单击夯击能。我国在引进强夯施工技术的初期，采用梅那公式（1）估算加固深度或单击夯击能。

$$h = a\sqrt{WH} \quad (1)$$

式中： h ——强夯的有效加固深度（m）；

W ——锤的质量（t）；

H ——夯锤落距（m）；

a ——强夯的有效加固深度修正系数。可液化土地基可取 0.4~0.5；Ⅰ级非自重湿陷性黄土以及非饱和黏性土地基取 0.35~0.4；填土地基取 0.4~0.5。

应用梅那公式估算加固深度时，需先由试验确定 a 值，在试验基础上梅那公式具有实用价值。影响加固深度的因素除单击夯击能外，夯击次数（夯遍数）、夯间距、锤底静压力、地基土性质、不同土层的厚度和埋藏顺序，以及地下水位埋深等都与加固深度有着密切的关系。鉴于单击夯击能与有效加固深度之间关系的复杂性，同时又无理想的计算方法，单击夯击能应当根据当地施工经验或现场试夯情况确定。

为便于工程应用,《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79)按粗颗粒土和细颗粒土两类土质,提供了各级单击夯击能的有效加固深度参考值。应当指出,这个有效加固深度是在达到饱和夯击能后才能实现的。

4.2.2 夯击次数应按照夯坑周围地面不发生过大隆起的原则确定。对于非饱和土,常以夯坑压缩量最大、夯坑周围隆起量最小,由现场试夯得到的夯击次数与夯沉量 $N-S$ 关系曲线确定,并以控制最后两击的平均沉降量不大于某一数值为停锤标准。一般情况下,对非饱和土应尽量连续施加夯击次数。对于饱和度较高的细颗粒土,夯击次数过多会导致部分夯击能量消耗在土的水平变形上,夯坑周围地面发生过大隆起,导致垂直压缩的夯击效率降低。一般情况下土的隆起体积不应大于夯坑体积的 30%。另外,夯坑过深还会使提锤困难,因此需要采取分遍强夯的施工方法。

一般情况下,非饱和土的强夯击数为 5~20 击;置换强夯为 10~25 击; **深层强夯** 为 15~30 击。

黄河冲(淤)积平原区域的地下水位高,地基土层因黄河水泛滥的冲(淤)积作用呈层状分布,土质主要为粉质土,包括粉土、粉质黏土、粉砂土,并夹有厚度不一的黏土层,地基条件相对复杂。特别是对地下水位较高的粉土、粉砂土地基,易形成液化;而黏土层较厚、埋置较浅时,则易形成“橡皮土”,应通过现场试验确定适宜的夯击次数。山东大学提出了一种确定液化地基强夯最优夯击数的技术方法,该方法通过在夯点下埋设动土压传感器和动孔隙水压传感器,试夯并采集地基瞬态响应数据,通过分析动应力幅值与工作夯击数曲线和动孔隙水压力幅值与工作夯击数曲线,确定最优夯击数。该方法经应用证明十分可靠。

4.2.3 单击夯击能、夯击次数和土质相同条件下,群夯的加固深度小于单点夯。这是因为群夯夯点间应力相互交叉、扩散产生群夯效应。为最大限度地降低群夯效应,增大加固深度,工程中常采取隔点、隔行加大夯间距的分遍强夯工艺。即在夯点布置方

式上分主夯点、次夯点及插夯点。在工艺流程上先夯主夯点、后夯次夯点和插夯点。

主夯点的间距较大、单击能量较高、夯击次数较多。后遍夯点布置在前遍夯点之间，其夯间距、单击夯击能和夯击次数逐步减小。一般工程多采用两遍点夯，由粗颗粒土组成的渗透性强的地基，强夯遍数可少些；当加固深度要求不是很大时，为提高施工效率，对粗颗粒土或非饱和黏性土亦可采取一遍成夯工艺。

对于由细颗粒土组成的弱渗透性地基（包括较松散软弱地基），考虑孔隙水压力消散问题，夯击遍数要求多些。分遍夯有利于地基土孔隙水压力的消散，降低液化程度，可提高夯实效果。另外，因夯击过程中夯坑过深发生起锤困难，为便于施工也应采取分遍复夯工艺，即在原夯点重复夯击 2~4 遍，直至达到停锤要求。例如，某典型工程，第一遍夯 2~3 击，第二遍复夯 4~6 击，第三遍复夯 5~7 击，第四遍复夯 7~9 击，累计夯击数达 18~25 击。

地基表层是基础的主要持力层，如处理不好将会增加建筑物的总沉降量和不均匀沉降。满夯的目的主要是处理点夯之间未夯到的土和填入夯坑内的虚土。如果夯坑较深、虚土较厚，可在夯点上复夯 2~4 击（俗称“加固夯”），然后再满夯一遍（相当于两遍满夯）。中高能量强夯应两遍满夯；中低能量强夯的夯坑深度不大时，亦可一遍满夯。应当指出，不是满夯能量越大、击数越多越好。对于表层含水量偏低或偏高的细颗粒土，过度满夯会导致扰动层过厚或形成“橡皮土”。

4.2.4 布点间距过大，将会降低单位面积平均夯击能并影响到加固效果；间距太小，除了会发生夯点间应力交叉的群夯效应外，夯击时上部土体易向侧面的夯坑挤出，造成坑壁坍塌、夯锤歪斜或倾倒，亦会影响强夯效果。对于“一遍成夯”的施工方法，布点间距就是夯间距。对于饱和细颗粒土，为便于超静孔隙水压力的消散，夯间距宜加大。对于深厚的填土地基，为提高加固深度，也多采取隔点或隔行强夯方法。

4.2.5 遍间隔时间取决于超静孔隙水压力的消散程度，其消散速率则与土质类别、夯点间距等因素有关。一般超静孔隙水压力消散率达到 75% 时，可进行下一遍强夯。宜通过在地基土中埋设孔隙水压力传感器监测其消散时间，确定两遍夯击之间的间隔时间。当缺少实测资料时，可根据地基土的渗透性参照本条规定确定遍间隔时间。非饱和的黏性土和湿陷性黄土，由于夯击后孔隙水压力增量不大，遍间隔时间可适当缩短。渗透性较好的粗粒土可连续夯击。

近年来，山东大学在山东德～滨高速公路、济～乐高速公路等多条高速公路开展了高速公路地基强夯加固试验。孔隙水压力消散过程监测结果表明，黄河冲（淤）积成因的粉土地基强夯后 1~2d 内孔隙水压力消散率就可以达到要求，因此，建议黄河冲（淤）积成因的粉土地基强夯加固的遍间隔时间为 2d。如果强夯加固深度范围内有含有厚度较大的中高液限黏土层，遍间隔时间应该通过现场试验确定。

4.2.6 由于基础的应力扩散作用和抗震设防需要，强夯处理范围应大于建筑物基础范围，具体扩大范围可根据建筑物结构类型、重要性等因素确定。对于一般正常固结的地基土，每边超出基础外缘宽度不宜小于 3m；对可液化地基，根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》（GB 50011）的规定，扩大范围应超出基础底面以下处理深度的 1/2，并不宜小于 5m；对于湿陷性黄土地基，尚应符合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》（GB 50025）的有关规定；对于回填厚度较大的填土，强夯处理范围宜为基底下设计处理深度的 1/2~2/3。

在基坑内或外扩受限情况下，对于正常固结的老土，强夯处理范围可按基础外缘外扩不小于 1.0m 处理，但应适当加强建筑物基础设计并相应调整上部结构设计，或采取其他措施对基础外缘地基进行适当处理。

4.2.7 场地平均夯沉量的大小与土质类别、夯击能量大小、夯击次数多少，以及夯点布置密度密切相关。夯沉量可通过试夯或

根据施工经验确定，一般为 30~120cm。含水量较低的表层土或粗颗粒土满夯时，接触锤底一定厚度的土层因扰动形成松散状态的扰动层。扰动层作为夯后地基的保护层，在基础垫层施工时予以清理，因此，夯前高程的确定除了应预留夯沉量外，还应留出扰动层的厚度。一般黏性土扰动层的厚度为 20cm 左右。碎石土、杂填土因粒径较大，留有扰动层后人工清理难度较大，用机械清理又会对下部造成新的扰动，因此建议碎石填土地基强夯不留扰动层，使满夯后的高程稍低于设计基底高程，然后用砂石找平碾压处理。

4.3 置换强夯

4.3.1 置换强夯对地基土的加固原理是：通过对夯点的反复夯填，夯点上的原状软土被强度较高的填料置换；在置换过程中对夯点周围的土有挤密加固作用；置换墩的排水作用加速地基土中孔隙水压力的消散。置换强夯施工方法分“点式置换”和“垫层置换”。

点式置换法是直接在地表夯出一定深度的夯坑，用装载机向夯坑内填料，反复夯填，直至完成全部夯击次数或填料量，并使最后两击沉降量达到停锤标准，完成一个墩体的夯击。一般置换填料分三至四次夯填完成。点式置换的优点是可连续夯击、置换深度较大；缺点是夯间土隆起很大，在清运隆起土方时，易将部分填料一同挖掉形成浪费。夯间土的隆起量与面积置换率、置换深度及地基土的有效压实率有关。

垫层置换法是根据地基土性质和置换深度、面积置换率的大小，考虑地基土有效压实率和预留夯沉量，把所需置换填料量折算为平面厚度，然后根据基底高程开挖土方，预先在基槽中铺设填料垫层，按一般强夯工艺施工后，用推土机填料平夯坑。垫层厚度的确定应防止墩间土隆起击穿垫层出露地面，使强夯结束后上浮的墩间土保持在设计基底以下 0.5m。垫层厚度亦可通过试夯确定。“垫层置换法”施工方便、效率高、节省填料，避免了

施工过程中的土方清运，当地表土较软时还可为夯机运行提供施工条件。

4.3.3 置换强夯法加固饱和软土，尽管因触变或液化土体的抗剪强度较低，但强行排挤的抵抗力还是非常大的。实践证明，较低夯击能达到一定的墩深后，其夯击的沉降量迅速减小，不利于墩体形成更大的深度。因此，置换强夯夯击能量不宜低于 $4000\text{kN}\cdot\text{m}$ 。在夯击能和夯击次数相同条件下，锤底静压力的大小对置换深度有明显差别。为增大锤底静压力，置换强夯施工多采用 1.2m 、 1.5m 小直径柱型锤。过小的锤径会发生柱型锤底部磨损后，夯锤摆放于地面时易歪倒的情况，因此，夯锤直径也不宜过小。

4.3.4

1 置换深度通常指形成置换墩的深度，要求置换墩穿透地基上部软土进入或接触下层相对硬土层，否则会形成“悬浮墩”，增大工后沉降量。置换深度的大小取决于地基土性质、土层结构和夯击能量、夯击次数及夯锤直径。一般置换强夯工艺所用夯击能量和夯击次数要高于普通强夯。由于置换墩底部向下的挤压效应，使得墩下土体也得到有效加固，因此置换强夯地基的加固深度大于置换深度。对于浅墩地基在评价夯后地基强度时，应考虑墩下土层的加固效果。对深厚饱和粉土、粉砂，因墩下土密度提高显著，故允许不穿透。上海宝钢的马迹山港码头曾采用 1.2m 直径夯锤、 $6000\text{kN}\cdot\text{m}$ 夯击能量夯 35 击，在海相沉积的淤泥层中形成了约 10m 深的置换墩。超过 10m 施工难度增大，一般常用的置换深度为 $4\sim 6\text{m}$ 。

2 单击能量和柱锤直径一定时，置换深度就取决于夯击次数。累计夯坑深度是夯点在完成全部夯击次数后的累加深度，与墩的置换深度不同。考虑到填入夯坑内的松散材料被压缩及向周围挤胀的因素，要求累计夯坑深度达到设计墩长的 $1.5\sim 2.0$ 倍。

3 因为柱锤的静压力较大，在软土中夯击很难达到普通强夯最终两击贯入度的标准，如果最终两击贯入度要求过小，墩体

向四周的挤压和膨胀的效应就大，将导致填料增加、地面隆起加大。置换强夯是以达到置换深度为主要目的，应以控制锤击次数为主、控制最终两击贯入度为辅。因此，置换强夯最后两击平均沉降量可比普通强夯大一些。但最后两击平均沉降量也不宜过大而影响墩体的密实度。工程实践中对置换墩用低能量补夯，会有效地提高墩体的密实度。

4.3.6 强夯的面积置换率是根据设计荷载要求确定的，亦可通过试夯或参考同类施工经验确定。夯锤直径确定后，墩点间距的大小取决于面积置换率的高低。

4.3.7 工程中置换填料多利用废弃材料，严格控制填料的粒径、级配等有一定困难。根据实际情况允许采用自然级配的填料，但因夯锤直径较小，粒径过大会影响夯击效果，必须对最大粒径做出要求。填料中土的含量过多会影响其加固效果，实践证明土含量以不超过 20% 为宜。建筑渣土中往往含有少量生活垃圾、木材、草皮、树根、腐殖质等杂质，应对建筑渣土进行有机质含量检测，参照相关标准和经验，提出了有机质含量不超过 5% 的规定。根据保护环境要求，不得使用可能对地下水造成污染的填料。经多年的实践，证明上述材料控制方法是可行的。

4.4 坑内深层强夯

4.4.1 坑内深层强夯是在夯坑内实施的夯击，相对地降低了起夯面，因此加固深度由两部分组成。首先是坑内起夯面以下由单击夯击能和夯击次数等条件决定的加固深度的部分；其次是起夯面以上的夯坑深度部分。

坑内深层强夯加固过程分三个步骤完成。第一步先夯击成坑：在夯击能量作用下，锤下土体被压缩时将产生以锤底直径为边缘的应力扩散角并形成“应力泡”，在夯锤周围侧面产生很大的被动压力，土体同时受到向下和四周的挤压，连续夯击时“应力泡”随沉降下移，形成较深的夯坑（一般能达到 5~10m），使夯坑周围的土得到挤密加固。当坑壁有坍塌时，可采取填料夯击

护壁措施。第二步是加固夯坑内下部土体：向夯坑内填入不超过 1.5 倍锤径高度的填料，然后继续夯击，在重锤作用下，填料向下和四周挤压形成扩散的高压强区，如此反复夯填，控制最后两击深降量达到设计要求值，在地基土的深部形成扩大头，同时在其周围形成超压密加固区和影响区，完成对深层地基土的有效加固。第三步是对夯坑分层夯填，每层填厚不宜超过 2 倍锤径，夯击次数不宜小于 2 击。坑内深层强夯需要预先夯击成坑后多次夯填，单击夯击能不宜小于 $4000\text{kN}\cdot\text{m}$ 。受目前施工能力的限制，加固深度以不超过 12m 为宜。

坑内深层强夯工艺要比普通强夯的加固深度大得多，当普通强夯要求的加固深度较大，但受到施工设备或施工环境的限制不能采用较高的夯击能量强夯加固时，可采用相对较低的单击夯击能量进行坑内深层强夯，以达到降低强夯振动对周围环境的影响、提高处理深度的目的。

4.4.3 在夯击成坑过程中，夯坑周边土体受挤压的效应明显，通过对夯坑底部的多次夯填，形成的扩大头直径大于夯锤直径。因此布点的间距可比置换强夯大一些。

4.4.4 坑底填料次数和夯击次数，取决于坑底以下的加固深度，因坑内夯击多采用柱型锤，其最后两击平均夯沉量可参照置换强夯标准执行。

4.4.5 坑内深层强夯的主要目的是增大加固深度，故可采用原状土或干土作为填料。如果采用粗颗粒或有胶结性质的填料时，会形成置换墩，其墩土应力比较大，可以参照置换强夯地基的方法检测加固效果。当夯坑采用土料回填时，夯点与夯点周围的土无大的差别，应该按普通强夯地基来检测。

4.4.6 因为坑内深层强夯的夯坑较深，加固深度亦大，为保证持力层的夯击效果，宜取偏高的满夯能量和夯击次数。

4.5 降水强夯

4.5.1 地下水位较高会影响夯实效果，特别是渗透系数在 $i \times$

$10^{-3} \sim i \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 的砂土、粉土地基，强夯时会发生严重的液化现象，采取降水措施加固效果明显。但对于渗透系数较小的饱和软黏土地基，即便采取了降水或设置竖向排水体的措施，其夯实效果也不理想，这种情况下应采用置换强夯法。由于土质条件、降水深度及施工工艺参数都对加固效果产生影响，故进行试夯是必要的。

4.5.2 降水强夯多采用轻型井点降水，按设计加固深度、土层情况及渗透性确定井点密度和井管深度。独立降水系统的面积，根据降水设备能力一般为 $700 \sim 800 \text{ m}^2$ 。在降水区域外可布置 $1 \sim 2$ 排井点，间距宜为 $1 \sim 2 \text{ m}$ 。对于渗透系数较大的砂土、粉土，工程中采取挖沟明排的降水方法，效果亦比较明显。强夯施工应在达到稳定水位深度后实施。

4.5.4 降水后的地基土，其含水量、饱和度依然保持较高水平，强度较低。其单击夯击能量可从 $400 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 逐渐增大到 $2000 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 以上，宜按复夯 $2 \sim 4$ 遍施工。

5 施 工

5.1 一 般 规 定

5.1.3 强夯施工会对周边环境产生一定的振动影响，目前国内还没有专门的强夯振动安全标准，安全距离的确定历来是强夯施工的难题。安全距离的确定涉及地基土的特性、所保护建（构）筑物的结构类别、强夯能级和夯锤面积的大小等诸多因素，如果不进行现场振动测试，很难给出确切的数据。但现场振动测试有时受工程限制无法做到，特别是在地基处理方案确定初期进行现场振动测试一般不现实。

根据目前所积累的施工经验和掌握的资料，强夯振动有一些普遍规律，可供设计和施工参考。了解强夯振动的这些特点和规律，在确定强夯施工方案时，就可以根据地基土的特点，对强夯振动影响做一些初步评估。

1 强夯振动主频率一般在 50Hz 以下，且随着距离的增大而减小。

2 强夯振动的振波在短距离内主要以面波的形式向周围扩散。振动强度随着距振源点距离的增大而衰减。振动强度的衰减速率和地基土的特性有关：当地基土层软弱、松散、密实度低、厚度大时，振动强度衰减迅速；当地基土层坚硬密实或软弱土层厚度薄、下卧土层坚硬时，振动强度衰减较慢。

3 强夯振源点位于低处时，在较高处的振动效应是放大；强夯振源点位于较高处时，在较低处的振动效应是衰减。

4 强夯振动强度随着能级的增大而增大，随着夯锤面积的减小而减小。

5 工程中一般采用国家标准《建筑工程容许振动标准》(GB 50868) 的相关规定来确定安全距离，见表 1。

表 1 强夯施工对建筑结构影响在时域范围内的容许振动值

建筑物类型	顶层楼面容许 振动速度峰值 (mm/s)	基础容许振动速度峰值 (mm/s)	
	1Hz~50Hz	1Hz~10Hz	50Hz
工业建筑、公共建筑	24	12	24
居住建筑	12	5	12
对振动敏感、具有保护价值、 不能划归上述两类的建筑	6	3	6

明确振动控制标准后，应确定相应的隔振技术方案，包括隔振沟开挖部位、隔振沟深度和长度，以及所采用的隔振材料等。传统隔振沟考虑到工程量及其沟坡的稳定性，一般开挖深度在 3m 左右。已有的研究表明，在同样的单击夯击能下，夯锤直径越小，强夯振动影响也越小；轻锤高落较重锤低落的振动影响要小，但由于缩小锤径和降低锤重会同时影响地基的加固效率，相关参数尚待进一步优化。

5.1.4 强夯施工侧向挤压水平位移的安全施工距离远小于强夯振动安全施工距离。其一般规律是普通强夯侧向水平位移小于置换强夯法。根据大连填海地基强夯试验和武钢四烧置换强夯试验检测结果，3000kN·m 能级强夯密实法侧向水平位移在 10m 处为 1.0cm；3000kN·m 能级的置换强夯法在 16m 处的水平位移为 14cm。

5.1.6 强夯施工应首先达到设计夯击次数的要求，并控制最后两击平均夯沉量达到标准。由于土层厚度差异和组成的不均匀性，当夯点的最后两击平均沉降量不满足要求时，应适当增加 2~3 击的夯击次数，这样做能够有效地消除夯后地基的不均匀沉降。柱型夯锤的锤底静压力值比较大，按表 4.2.1 的标准控制最后两击平均沉降量比较困难，亦不合理，因此允许通过试夯或根据地区经验适当放宽。

5.3 施工机具

5.3.1 早期的夯锤为了降低成本，采用钢板焊接壳体内部浇筑混凝土制成，由于体积质量小、锤的厚度大，排气孔易被堵塞，清理困难，目前已被淘汰并替换为铸钢夯锤。置换强夯用的柱锤锤高 H 与锤径 d 比为 $1.0\sim 3.0$ ，这种锤具有较高的贯入力，有利于达到置换深度。由于柱锤的直径小、高度大，因此不设排气孔。

5.3.2 为防止落锤时吊臂后倾，必须在吊臂底节上部设置弹性支撑。当单击夯击能超过所选用设备的起重能力时，可在吊杆端部设置辅助门架，以提高起重能力，增加稳定性。辅助门架可采用格构式或其他结构。其两支腿及横梁的强度与稳定性必须满足使用安全要求。

5.4 施工作业

5.4.2 点式置换法夯点周围隆起较大，有时软土挤出影响施工，**可随时挖除清理并在夯点周围铺垫碎石继续施工**。对单个夯点无论采取几次夯填均应连续施工。应根据置换深度、面积置换率和地质条件预先估计隆起值，以便合理确定起夯面高程和控制夯后场地高程。

5.4.3 垫层置换法由于事先在基槽内设置了一定厚度的粗粒料垫层，可以按普通强夯的工艺方法施工。当夯点上的垫层材料被夯入深部地基土中形成置换墩时，墩间土向上挤压使垫层隆起，将隆起的垫层材料填入夯坑内继续夯击，最终使置换墩深度达到设计要求完成施工。为使墩间软土不击穿垫层挤出地表面，应适当加大置换垫层的厚度。垫层置换法工效高、效果好。

5.4.4 当施工环境或设备能力受到限制，而加固深度要求较大时，可采用坑内深层强夯方法。当坑内深层强夯采用场外填料时，应考虑场地的隆起量不预留场地平均夯沉量；当采用场内土料时，应预留场地平均夯沉量。在夯击成坑过程中遇有塌孔现象

时可提前进行填料处理。

5.4.6 《建筑工程冬期施工规程》(JGJ 104) 允许冬期强夯施工, 但《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79) 对强夯的冬雨季施工问题未作具体规定。当气温低于冰点, 由于土中富含水分, 地表层将发生冻结, 冻层的厚度与气温和冻结时间等有关。冻层的存在会消耗夯击能, 影响加固深度。如施工时地表有冻土层, 最常采取的工程措施是视冻土层厚度增加 2~3 击的夯击次数将冻土层击穿。击穿冻土层的夯击次数不计入设计总夯击次数。工程实践表明, 冬期施工的强夯地基, 夯后取土样检测, 均未发现冻土块未被夯实的现象, 加固质量都能满足要求。这是因为在反复夯击作用下, 夯点下的冻土块都能被夯到冻结深度以下, 大块冻土分解成小块, 并吸收夯击能降低了冻结程度, 加上地温作用, 冻土块一般在满夯前也会融解。因此当夯坑中的冻结土块粒径与含量符合《建筑工程冬期施工规程》(JGJ 104) 的要求时, 满夯质量是有保证的。应当指出, 冬期施工推填夯坑时, 应将大块冻土推出场地外, 不应将其填入夯坑内, 土中不得含有冰雪及其他杂物。推平夯坑后应及时满夯, 否则因表层土再冻结、满夯能量小, 满夯质量将得不到保证。

雨期强夯施工的主要问题是防排水。首先是排水, 强夯场地应做出排水坡度和排水沟井, 使降水迅速地汇集并排走; 其次是覆盖, 防止雨水渗透到土层中。因雨期满夯时推入夯坑内的虚土会因“海绵效应”大量吸水, 增加地基土的含水量, 满夯时极易产生“橡皮土”现象, 雨期强夯施工应及时满夯。当天气突变来不及正规满夯时, 可先在夯点上夯 1~2 击, 将填入夯坑内的虚土夯实, 或对场地进行临时碾压处理, 以提高其抗渗透能力。雨期强夯宜采取分区块施工方法, 即在某一个时间段内, 尽量将单位区块内的点夯和满夯全部处理完毕。避免因“全面开花”来不及满夯形成“泡槽”现象。在起夯面以下换填一定厚度的粗骨料垫层, 能大大改善雨期施工强夯效果, 其厚度可根据经验或试夯确定。满夯前换填一定厚度的粗颗粒材料再满夯也具有理想的效果。

6 施工监测、质量检测 and 验收

6.2 质量检测 and 验收

6.2.1 对于细颗粒饱和黏性土，其孔隙水压力消散时间比较长，强度增长缓慢，因此，夯后竣工验收的质量检测应满足休止期要求，其时间长短主要取决于土的性质及其含水量、饱和度；碎石类粗颗粒土不存在孔隙水压力消散问题，夯后地基的强度提高较快，其休止期较短。因置换强夯对土的扰动较大，故休止期较长。

6.2.2 夯后地基承载力的检测应以静载荷板试验为主，并结合动力触探、标准贯入试验、静力触探试验以及室内土工试验等方法综合确定。一般检测方法不少于两种。加固深度和均匀性的检测，碎石土、建筑渣土、杂填土、砂砾土等粗颗粒地基应采用重型或超重型动力触探方法；对于砂土、粉土等可液化地基和一般黏性土、素填土等地基，应采用标准贯入试验、静力触探试验方法；对于湿陷性黄土的湿陷性指标，应采用探井取原状土做室内土工试验方法进行检测。置换墩的密实度与其强度有直接的关系。墩长是否穿透软土进入好的土层，关系到工后沉降的大小，墩下土的物理力学指标对置换墩的承载能力也有一定的影响，特别是在墩较短的情况下影响更大，因此对置换墩体的密实度检测提出了要求。实践证明，当按复合地基来评价置换强夯地基的承载力时，除饱和和粉土外，采用夯前天然地基土承载力特征值，其安全是有保障的。

6.2.3 本条依据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79) 和《建筑地基基础工程施工质量验收标准》(GB 50202) 的有关规定，明确了夯后地基承载力、加固深度和加固均匀性的检验点数量。