

ICS 93.020

CCS P22

DB21

辽宁省地方标准

DB21/T-xxx-202x

备案号 Jxxxx-202x

强夯地基处理技术规程

Technical Specification for Ground Treatment by Dynamic
Compaction

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

辽宁省住房和城乡建设厅

辽宁省市场监督管理局

联合发布

辽宁省地方标准

强夯地基处理技术规程

Technical Specification for Ground Treatment by Dynamic
Compaction

DB21/T-XXX-202x

Jxxxx-202x

主编单位：中国建筑东北设计研究院有限公司
辽宁省建设科学研究院有限责任公司

批准部门：辽宁省住房和城乡建设厅

施行日期：202X年X月X日

×××××出版社

202X 沈阳

前 言

本规程是根据辽宁省市场监督管理局《关于征集 2025 年度辽宁省地方标准制修订计划项目的通知》（辽市监函〔2025〕3 号）要求，由中国建筑东北设计研究院有限公司和辽宁省建设科学研究院有限责任公司会同有关单位编制完成的。规程编制组经过广泛调查研究，认真总结工程经验，参考国家标准、行业标准和地方标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本规程。

本规程共分 6 章，主要内容包括总则、术语和符号、基本规定、设计、施工、监测、质量检测和验收、附录。此外，本规程的某些内容可能涉及专利，发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由辽宁省住房和城乡建设厅负责管理，由中国建筑东北设计研究院有限公司和辽宁省建设科学研究院有限责任公司负责具体内容的解释。执行过程中，如有意见和建议，请反馈至中国建筑东北设计研究院有限公司（地址：沈阳市和平区光荣街 65 号，邮编：110000；邮箱：）。

本规程主编单位：中国建筑东北设计研究院有限公司
辽宁省建设科学研究院有限责任公司

本规程参编单位：中建东设岩土工程有限公司
山西金宝岛基础工程有限公司
哈尔滨工业大学
中国能源建设集团辽宁电力勘测设计院有限公司
大连市勘察测绘研究院集团有限公司
辽宁盛京勘察研究院有限公司
沈阳建材地质工程勘察院有限公司
沈阳市勘察测绘研究院有限公司
辽宁省水利水电勘测设计研究院有限责任公司
辽宁水文地质工程地质勘察院有限公司
东港市东建工程咨询有限公司
中化学生态环境有限公司

本规程主要起草人员：

（以下按姓氏笔画为序）

本规程主要审查人员：

目 次

1 总 则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	3
3 基本规定	4
4 设计	6
4.1 一般规定	6
4.2 普通强夯	7
4.3 强夯置换法	8
4.4 孔内深层强夯	10
4.5 降水强夯	11
4.6 特殊土的强夯处理	11
5 施工	15
5.1 一般规定	15
5.2 场地准备	16
5.3 施工机具	17
5.4 施工作业	17
5.5 施工质量控制	19
6 施工监测、质量检测和验收	22
6.1 一般规定	22
6.2 施工监测	22
6.3 质量检测与验收	23
附录 A 强夯施工记录	26
本规程用词说明	28
引用标准名录	33
附：条文说明	

Contents

1	General Provisions	.....
2	Terms and Symbols	.....
2.1	Terms	.....
2.2	Symbols	.....
3	Basic Requirements	.....
4	Design	.....
4.1	General Requirement	.....
4.2	Dynamic Compaction	.....
4.3	Dynamic Replacement	.....
4.4	Down-hole Dynamic Compaction	.....
4.5	Dewatering Dynamic Compaction	.....
4.6	Dynamic Compaction of Special Soils	.....
5	Construction	.....
5.1	General Requirement	.....
5.2	Preparation of Construction Site	.....
5.3	Construction Machine	.....
5.4	Construction Procedure	.....
5.5	Construction Quality Control	.....
6	Construction Monitoring, Quality Test and Acceptance	.....
6.1	General Requirement	.....
6.2	Construction Monitoring	.....
6.3	Construction Quality Test and Acceptance	.....
	Appendix A Dynamic Compaction Logs	.....
	Explanation of Working in This Code	.....
	List of Quoted Standards	.....
	Addition: Explanation of Provisions	.....

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适用、经济合理、质量可靠、保护环境，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于辽宁省内建筑及市政工程强夯地基处理的设计、施工和质量检测与验收，其他行业可参照执行。

1.0.3 强夯地基处理应综合考虑工程地质条件、工程特点、环境条件、施工条件和工期等因素，遵循因地制宜、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现行有关规范、标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 强夯地基处理 ground treatment, dynamic compaction

为提高地基承载力和变形稳定性或改变渗透性质，采用重型夯锤夯实和加固地基的方法；可分为强夯法和强夯置换法。

2.1.2 强夯法 dynamic compaction, dynamic consolidation

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

2.1.3 强夯置换法 dynamic compaction replacement

强夯地基处理施工时，在形成的夯坑内填入砂石、矿渣、建筑固废等硬质粗颗粒材料，并反复夯填，使其穿透或部分穿透软弱土层形成密实墩体的地基处理方法；分为桩式置换法和垫层置换法。

2.1.4 桩式置换法 method of point substitution

直接在地表先夯出一定深度的夯坑，向夯坑内填入硬质料夯实，反复夯填，直至完成一个夯点的填料量和夯击次数的方法。

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，预先在场地中换填一定厚度的粗颗粒填料垫层，然后在垫层上强夯的方法。

2.1.6 孔内深层强夯 down-hole dynamic compaction

在场地内先成孔至预定深度，然后自下而上在孔内分层填料强夯或边填料边强夯，形成高承载力的密实桩体和强力挤密的桩间土。

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

从最初被加固地基土表面算起，经强夯地基处理后地基土满足了设计要求指标的厚度。

2.1.9 单击夯击能 energy of single rammer

夯锤自由落体时夯击一次产生的冲技能，取锤重与落距的乘积。

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

同一夯击场地上，主夯夯击能间隔施工的遍数。

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 compaction spacing

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

静止状态下，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 disturbed layer

满夯后地表层松散部分。

2.1.21 间歇时间 interval 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 compaction point and inserting compaction 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、低饱和度的粉土与黏性土、湿陷性黄土等地基。强夯置换法适用于处理饱和软黏土、粉土、淤泥质土、有软弱下卧层的填土等对地基变形要求不严格的工程。孔内深层强夯适用于处理回填土、大厚度杂填土、湿陷性黄土、软弱土、液化土、风化岩、膨胀土、红粘土，以及存在地下人防工事、古墓、岩溶土洞、硬夹层软硬不均等各类复杂疑难地基。

3.0.2 确定强夯地基处理方案应充分收集以下资料：

- 1 详细的岩土工程勘察资料，上部结构及基础设计资料；
- 2 人工填土地基应有填土场地原地表的地形地貌、地表植被、地表水分布及填土前的地表处理、排水、清淤等资料；并应有填土的岩土成分、土石比及颗粒级配等资料；
- 3 地基存在的主要问题和处理范围以及处理后要求达到的各项技术、经济指标等资料；
- 4 当地强夯地基处理施工经验和施工情况以及地区相似场地上同类工程的处理经验和使用情况等资料；
- 5 临近建（构）筑物、地下工程、周边道路和有关管线等情况；
- 6 掌握工程场地周边的环境情况。

3.0.3 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、上部结构、建（构）筑物荷载、基础形式等条件，考虑上部结构、基础与地基的相互作用，经技术经济比较确定地基处理方案，并提出如下技术要求：

- 1 处理范围；
- 2 有效加固深度与影响范围；
- 3 夯后地基承载力特征值；
- 4 夯后地基土变形参数和地基稳定性要求；
- 5 夯后地基均匀性及加固效果检测方法、数量等。

3.0.4 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不利影响时，应评估强夯施工振动、噪声对周边环境的影响程度，明确施工安全距离和减、隔振及降噪措施。安全施工距离通过现场试夯振动测试确定，也可按当地经验确定。当无法通过试夯或当地经验确定时，应进行专项振动影响评估。

3.0.5 强夯和强夯置换施工前，应在施工现场有代表性的场地上选取一个或几个试验区，进行试夯或试验性施工，确定其适用性、处理效果和施工工艺，试验区数量应根据场地复杂程度、建（构）筑物规模及类型确定。

3.0.6 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。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。

3.0.7 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。

3.0.8 处理后地基的承载力验算，应同时满足轴心荷载和偏心荷载作用的要求，还应符合抗震的有关要求；确定强夯地基承载力特征值的现场地基载荷试验应符合国家现行有关标准的规定。

3.0.9 按地基变形设计或应做变形验算且需进行地基处理的工程，应对处理后的地基进行变形验算。

3.0.10 对建造在处理后的地基上受较大水平荷载或位于斜坡上的建（构）筑物，应进行地基稳定性验算。

3.0.11 强夯地基处理所采用的材料，应符合有关标准对耐久性设计与使用的要求。

3.0.12 处理地基上的建筑物应在施工期间及使用期间进行变形观测，直至沉降达到稳定为止。

3.0.13 地基处理施工中应有专人负责质量控制和监测，宜配备智能化、数字化监测装置，并

做好施工记录；当出现异常情况时，必须及时会同有关部门妥善解决。施工结束后应按本规程或国家有关标准的规定进行工程质量检验和验收。

3.0.14 场地地下水位高，影响施工或夯实效果时，应采取降水、表面碾压结合明排或其它技术措施进行处理。

3.0.15 强夯地基处理可与其他地基处理方法联合使用。

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 试夯区数量应根据场地的复杂程度、建（构）筑规模及类型等确定。试夯区应具有代表性，其面积不宜少于 400 m²，宜方格网形布置。

2 宜采用不同的施工工艺参数方案进行试夯。

3 对于可液化粉土、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，根据土质情况分为一周到数周。

5 夯前与夯后的检测方法及其数量宜相对应。

4.1.3 应对各试夯区的夯点和夯间土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。强夯及强夯置换试验应包括下列内容：

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 确定合适的单击夯击能、夯遍数、夯击次数、夯间距、最后两击夯沉量平均值和间歇时间等施工工艺参数。

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）筑物和环境影响。确定工程的最小安全振动距离和减、隔振及降噪措施。

6 选定适宜的置换材料。

4.1.4 试夯前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。当周边环境敏感复杂时，宜在试夯场地周边及敏感建（构）筑物上对试夯进行振动监测，分析振动衰减规律，确定与周边工程的安全施工最小距离和减振措施。

4.1.5 强夯地基的变形计算，应符合《建筑地基基础设计规范》（GB50007）的有关规定，地基变形计算深度应大于强夯地基处理深度。夯后地基有效加固深度内土的变形指标，应通过原位测试或土工试验确定。当计算深度下部仍存在软弱下卧层时，尚应验算下卧层的地基承载力和变形。对于墩下地基土的变形可按置换墩材料的压力扩散角计算传至墩下土层的附加应力。

4.1.6 强夯置换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。

4.1.7 强夯置换复合地基承载力可按下列公式计算：

$$f_{spk} = mf_{pk} + (1 - m)f_{sk} \quad (4.1.7)$$

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（%）。

4.1.8 强夯置换复合地基的变形宜按单墩复合地基静载试验确定的变形模量计算加固区的地

基变形。没有试验资料时，各复合土层的压缩模量可按式计算（复合土层的分层与天然地基相同）：

$$E_{spi} = \frac{f_{spk}}{f_{ak}} E_{si} \quad (4.1.9)$$

式中： E_{spi} —— 计算深度内第*i*层复合土层压缩模量（Mpa）；
 E_{si} —— 计算深度内第*i*层土压缩模量（Mpa）；
 f_{ak} —— 基础底面下天然地基承载力特征值。

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

4.1.10 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。

4.1.11 对于厚度大于8m的高填方地基，宜采用分层强夯法或采用孔内深层强夯处理。分层强夯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。

4.1.12 强夯地基处理过程中应动态化设计和信息化施工。

4.2 普通强夯/强夯法

4.2.1 强夯法的有效加固深度应根据现场试夯或当地经验确定，在缺少试验资料或经验时可按表4.2.1预估。

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	≤10.0
5000	8.0~8.5	7.0~7.5	≤10.0
6000	8.5~9.0	7.5~8.0	≤15.0
8000	9.0~9.5	8.0~8.5	≤15.0
10000	9.5~10.0	8.5~9.0	≤20.0
12000	10.0~11.0	9.0~10.0	≤25.0
14000	11.0~12.0	10.0~11.0	≤25.0
16000	12.0~13.0	11.0~12.0	≤25.0
18000	13.0~14.0	12.0~13.0	≤25.0
20000	14.0~15.0		≤25.0
25000	15.0~16.0		≤25.0

注：强夯法的有效加固深度应从最初起夯面算起；单击夯击能大于18000 kN·m时，强夯的有效深度应通过试验确定；对于高水位场地，有效加固深度应适当降低。

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确定，并控制夯

坑周围的土体不发生太大的隆起，且不因夯坑过深而发生提锤困难，最后两击平均夯沉量宜满足表 4.2.1 的要求。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，并适当增加遍数；满足收锤标准后若夯坑深度超过 3m，应回填进行原点加固夯处理（新地基处理条文）；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。

最后以低能量（轻锤或低落距）满夯 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。满夯后地表应加一遍机械碾压，以满足地基土的压实度要求。

对于低能级夯坑可通过就地整平调整标高，对于高能级强夯应回填含土量不超过 20%、粒径在 0.5m 以内的中风化以上碎石。

4.2.4 夯点可根据基础底面形状布置。对于面积较大的筏板基础、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、柱位置布置夯点，并应保证承重墙、柱以及纵、横墙交汇处布有夯点；工业厂房可按柱网设置夯击点，柱下应设有夯点。

第一遍强夯布点间距宜为锤径的 2.5~3.5 倍，低能级或锤径小时宜取小值，高能级及考虑能级组合时宜取大值，饱和砂土地基夯击点间距宜适当增大。第二遍夯击点应位于第一遍夯击点之间，以后各遍夯击点间距可适当减小。对处理深度较深或单击夯击能较大的工程，第一遍夯击点距宜适当增大。

4.2.5 两遍夯击之间，应有一定的间歇时间。间歇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，可根据地基土的渗透性确定，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；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。对于一般建筑物地基，强夯加固范围宜向基底外边缘扩延 $1/2 H_0 \sim 2/3 H_0$ （ H_0 是指基底下设计有效处理深度），且不应小于 3m；对可液化地基，基础边缘的处理宽度，不应小于基底下可液化土层处理深度的 1/2，且不应小于 5m，重大建筑物地基，强夯加固外延范围不应小于可液化地基基础边缘的处理宽度；湿陷性黄土地基应符合《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025 的有关规定。

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。夯后地面整平标高应根据场地使用要求、土方开挖平衡确定。

4.3 强夯置换法

4.3.1 强夯置换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 强夯置换复合地基的设计应包括如下内容：

- 1 强夯置换深度；
- 2 强夯置换处理范围；
- 3 材料选择与计量；

- 4 夯击能、夯锤参数、落距；
- 5 夯点的夯击击数、停夯标准、两遍之间时间间隔；
- 6 夯点平面布置形式；
- 7 复合地基变形和承载力要求；
- 8 周边环境保护措施；
- 9 现场监测和质量控制措施；
- 10 施工垫层；
- 11 检测方法、参数、数量要求。

4.3.3 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。

4.3.4 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 kN·m。宜采用柱形锤，直径为 1~2m，锤底静压力值为 100~200 kPa。

4.3.5 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 累计夯沉量应达到设计墩长的 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通过试夯确定，并按表 4.2.1 确定。

4.3.6 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。

4.3.7 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 2~3 倍；独立基础或条形基础宜取夯锤直径的 1.5~2.0 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。

4.3.8 除湿陷性土、膨胀土等遇水工程特性发生显著变化的场地，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》（GB18599）的要求。

4.3.9 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，当表层土松软时，铺设 1.0m~2.0m 厚的砂石垫层，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。

4.3.10 强夯置换设计时，应预估地面抬高值，并在试夯时校正。

4.3.11 强夯置换地基处理试验方案应按本规程第 4.1.2 条的规定确定，除应进行现场静载荷试验和变形模量检测外，尚应采用超重型或重型动力触探等方法，检查置换墩着底情况及承载力与密实度随深度的变化。

4.3.12 强夯置换地基的承载力特征值应通过现场单墩静载荷试验确定；对于饱和粉土地基，当处理后形成 2.0m 以上厚度的硬层时，其承载力可通过现场单墩复合地基静载荷试验确定。

4.3.13 强夯置换地基的变形宜按单墩静载荷试验确定的变形模量计算加固区的地基变形，对墩下地基土的变形可按置换墩材料的压力扩散角计算传至墩下土层的附加应力，按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007 的有关规定计算确定；对饱和粉土地基，当处理后形成 2.0m 以上厚度的硬层时，可按本规程 4.18 条的规定确定。

4.3.14 碎(砂)石桩联合低能级强夯适用于下部为软土、冲填土地基，上部为碎石填土地基，并应符合下列规定：

- 1 上部填土应在碎(砂)石桩施工完成后回填,然后进行强夯；
- 2 碎(砂)石桩联合低能级强夯软土地基变形计算包括上部填土强夯段和下部碎(砂)石桩

段的沉降。上部填土段的压缩模量应通过原位测试确定；下部碎(砂)石桩段的压缩模量应采用复合土层压缩模量，其计算应符合本规程第 4.1.8 条的规定。

4.3.15 强夯置换法处理冻胀融沉性强的地层适用性应通过现场试验确认。

4.4 孔内深层强夯

4.4.1 孔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 30m，处理后复合地基承载力特征值不宜大于 600kPa。初步估算加固深度时，可按表 4.2.1 推荐的加固深度加上孔底起夯面以上的夯孔深度计算。宜取中、高级夯击能。

4.4.2 夯锤参数可参照本规程 4.3.4 条的要求选用。

4.4.3 根据场地的工程性质、环境条件，可选用钻孔掏孔或重锤夯击成孔。

4.4.4 布点间距可根据成孔方式确定，一般机械钻孔、掏孔中心距取 2~3 倍成孔直径，冲击成孔中心距取 2~3.5 倍成孔直径；孔位偏差应不大于 5cm，垂直度控制不大于设计孔深的 1.5%，孔深偏差应不大于 0.5m，孔径偏差应不大于 2cm。夯点布置形式执行本规程第 4.2.4 条的规定。

4.4.5 孔内深层强夯的桩端宜置于性状较好的土层上。当有软弱下卧层时，应经过验算来确定地基处理深度。

4.4.6 整片地基处理宽度应根据地基处理深度、地基岩土特性和建筑物的特征而定。自基础侧边外延宽度可采用地基处理深度的 1/3，当桩体填料为活性胶结性材料时，可适当减少或不外延。

4.4.7 桩顶与基础之间应设置褥垫层，褥垫层厚度应为 150mm~300mm，可选用碎石、中粗砂或灰土垫层。

4.4.8 单个夯点的总夯击次数由预夯成孔、孔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。

4.4.9 孔内填料应采用非腐蚀性、对地下水无污染的材料，可采用现场的素土或灰土、砂土、碎石、建筑固体垃圾、工业废料、混凝土、水泥土、水泥粉煤灰土等，亦可采用本规程第 4.3.8 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。填料的粒径、配比可参照表 4.4.9 确定。

表 4.4.9 填料的粒径、配比

桩型	填料	填料粒径	配比
素土桩	黄土、粉土、砂土、黏土、杂土	$\leq(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{5})$ 成孔直径	单组分、双组分或多组分的混合桩体
渣土桩	土、碎砖瓦、砂、石料、混凝土块、无害的工业废料及其混合物	$\leq(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{3})$ 成孔直径	单组分、双组分或多组分的混合桩体
碎石桩	碎石、石屑	$\leq(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{5})$ 成孔直径	碎石或碎石夹石屑
灰土桩	石灰、土	灰： $\leq 10 \sim 20\text{mm}$	2:8
		土： $\leq(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{8})$ 成孔直径	3:7
生石灰桩	生石灰块、粉煤灰	$\leq(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{4})$ 成孔直径	6:4 7:3
三合土桩	灰、土、渣土	$\leq \frac{1}{8}$ 成孔直径	1:1.5
粉煤灰桩	粉煤灰或粉灰、土		1:3
水泥土桩	水泥、土		1: 2~4

4.4.10 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 场地地下水位高或场地表层土软弱，影响施工或夯实效果时，应采取降水措施或铺填一定厚度砂石材料。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。

4.5.5 施工前，宜将地下水位降低至坑底以下 2m，施工时坑内或场地积水应及时排除，对细颗粒土，宜将地下水位降至夯坑深度及毛细水上升高度以下，避免地下水过多消耗夯击能以及土体液化，并采取晾晒等措施降低含水量；地基土的含水量低影响处理效果时，宜采取增湿措施。

4.6 特殊土的强夯

4.6.1 软土地基可采用强夯置换法、降水后低能级强夯法或设置竖向排水体强夯法等方法处理。

4.6.2 软土地基大面积强夯处理前，应结合勘察报告进行暗浜、软弱下卧层排查，并应将沟浜塘换填。当场地表土软弱，宜铺填 0.5~2.0m 厚度的松散粗骨料垫层以利于设备运转，必要时不断在夯点周围加厚垫层，避免地面松软。

4.6.3 软土地基强夯宜采用低能级、少击数、多遍夯，先低能级后高能级的原则进行，防止橡皮土的产生，必要时采用预夯。宜采用 2 遍~4 遍进行夯击，单击夯击能宜由小到大，具体工艺参数应通过试夯确定。

4.6.4 试夯应选择有代表性的区域进行，通过夯沉量、地下水位、孔隙水压力监测以及夯前夯后加固效果的检测确定夯击能、夯击击数、有效加固深度和间歇时间等设计参数。

4.6.5 夯点间距应根据建（构）筑结构类型、需加固土层的厚度和土质条件等因素综合确定。厚度大和土质差的软土层夯点间距宜为 5m~7m，土层较薄的夯点间距宜为 4m~6m，下一能级夯点应位于上一能级夯点中间。

4.6.6 单点夯击数应根据需加固土层的厚度、表层土质情况及使用要求确定，要求夯击时夯沉量最大，周边隆起量最小。粗粒土含量多、表层土较硬或使用荷载大时，可取 6 击~8 击；联合排、降水措施处理可取 2 击~6 击。单点夯击数宜满足以下条件：

1 应按设计锤击数或试夯确定的锤击数执行；

2 最后两击的平均夯沉量不宜大于以下数值：当夯击能小于 2000 kN·m 时，为 50mm；当夯击能为 2000 kN·m~4000 kN·m 时，为 150mm；

3 夯坑周围地面不应发生过大隆起；

4 不因夯坑过深而发生提锤困难。

4.6.7 前后两遍夯击间歇时间应根据软土中超静孔隙水压力消散 75%以上所需时间确定。当

缺少实测资料时,可根据地基土的渗透性确定。对含水率高、软土层较厚的粉质黏土和粉土,间歇时间宜为2周~4周。

4.6.8 降水后强夯处理应根据处理面积、处理深度和降水方法划分成若干个各自独立的降水系统,假设采用井点降水,降水系统外3m~4m处宜布置1排~2排封堵井点,井点间距宜为1m~2m。降水系统内应按设计加固深度、土体渗透性确定井点密度和降水井深度、降水时间、降水深度,井点宜布置成等边三角形或正方形网格。

4.6.9 竖向排水体强夯法应符合以下规定:

- 1 竖向排水体宜为碎石或砂石混合料,排水体宜布置在夯点之间;
- 2 竖向排水体的深度应满足强夯处理厚度的要求;
- 3 地表铺设与竖向排水体材料相近的砂石垫层,垫层厚度不应小于500mm;
- 4 砂石垫层所用砂料宜为中粗砂,含泥量不宜大于5%,砂料中粒径大于50mm的碎石不应大于总量30%,其渗透系数宜大于 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$;
- 5 强夯能级不宜大于 $4000 \text{kN} \cdot \text{m}$,强夯形成的夯坑应采用和砂石垫层相同的砂石料回填。

4.6.10 强夯法处理人工填土地基应考虑填土场地及邻近场地原始地形地貌、地层、地表水及地下水分布与排泄路径等因素,回填前的场地处理应符合下列规定:

- 1 人工填土地基填筑前应先清除或处理场地填土层底面以下的耕植土和软弱土层;
- 2 回填前的场地软弱土层的处理可采用抛石挤淤、强夯和强夯置换、挖除换填、振冲桩等方法;
- 3 当高填方地基原地基需要加固,其天然坡度在1:5~1:2.5之间时,应将天然地面开挖成倒坡台阶形状,台阶宽度不应小于2m,当天然坡度大于1:2.5时,应验算地基整体稳定性。

4.6.11 人工填土地基强夯宜根据建筑物对地基处理要求、场地原始地形地貌、地表水分布及处理与清淤情况、场地土指标、改变的水文地质条件及地下水排泄路径及周边环境条件、填土厚度等,采用强夯法、强夯置换法、孔内强夯或其他地基处理相结合的方法,确定合理的工艺方法和施工参数。有效加固深度应根据现场试夯或地区经验确定,当无试验资料或经验时可按4.2.1进行估算。

4.6.12 对于深厚填土地基,宜分层填筑、分层夯(压)实、分层检测,且处理后的填方地基应满足密实、均匀和稳定性要求,检测合格后方可进行下一道工序施工。

4.6.13 人工填土强夯地基的填料选择应符合下列要求:

- 1 级配良好的粗粒料(满足不均匀系数 $C_u > 5$ 且曲率系数 $1 < C_c < 3$);
- 2 性能稳定的工业废料、建筑垃圾;
- 3 粉质黏土、粉土作为填料时,其最优含水量可采用重型击实试验确定;
- 4 大块石填土材料最大粒径不应大于800mm;
- 5 不应使用淤泥、耕土、冻土及有机质含量大于5%的土。

4.6.14 人工填土强夯地基的回填应符合下列规定:

- 1 成分简单、粒径均匀的回填土可采用抛填;
- 2 成分复杂、粒径不均匀的块石和碎石土回填地基,除抛石填海和抛石挤淤外,应采用分层堆填,禁止抛填,分层堆填的亚层厚度可取0.8m~1.2m;
- 3 人工填土地基强夯时,强夯影响深度宜达到人工填土层底部;填筑厚度应根据强夯的有效加固深度确定,对于填土高度较大的高填方地基,应将填土分层回填、分层强夯,填土地基的强夯分层厚度可按表4.6.14控制。

4 人工填土强夯地基宜作为厂区道路、室内外地坪及管网地基使用,当作为多层建筑、工业厂房地基使用时,应考虑不均匀沉降对上部结构的不利影响。

表 4.6.14 填土地基强夯的分层厚度

单击夯击能 (kN·m)	控制填土厚度 (m)
3000	4.0
4000	6.0
6000	8.0

5 当填土区有地下径流、泉水、裂隙水出露时，应在填筑体中构筑排水盲沟网，排水盲沟网应设在两个强夯地基处理分层的中间，排水盲沟网可根据填土区的高度设一层或数层，排水盲沟应用土工布包裹。

6 对深厚填土的地基处理应评价场地水文地质条件改变后地表水和地下水对建筑地基承载力和变形产生的不利影响，必要时应根据地形修筑截水沟、盲沟或涵洞等排水设施。

7 在新近高填方夯实地基上建造建(构)筑物应根据处理后地基实测变形趋势及拟建工程变形控制要求确定开始施工时间，并不应少于 1 个雨季的自然密实期。

4.6.15 当回填区较大，相邻施工工作面之间搭接部位处理应符合下列规定：

1 当各工作面施工起始填筑标高不同时，从低处开始相邻工作面的高差不宜大于施工时一个填筑层厚度；

2 不同填筑层搭接面应在竖向位置错开；

3 相邻施工工作面搭接部位应采用强夯补强处理，补强处理宽度不应小于夯点间距的 2 倍和每层填筑层厚度；

4 工作面搭接部位强夯法处理分层厚度不宜大于 4m，施工参数及夯实指标宜符合表 4.6.15 的规定。

表 4.6.15 工作面搭接处强夯施工参数

夯点形式	单击夯击能 (kN·m)	夯点间距 (m)	夯点布置	单点击数	地基夯实指标	
					粗粒土	细粒土
点夯	3000	3.5	正方形	10~12	粗粒土	细粒土
满夯	1000	锤印搭接		3~5	干密度 $\geq 2.0t/m^3$	压实系数 ≥ 0.97

注：点夯最后两击的平均夯沉量不应大于 50mm。

4.6.16 湿陷性黄土地基强夯处理应根据建筑物对地基的要求、场地岩土及周边环境条件、湿陷性黄土厚度等，采取强夯法、强夯置换法、孔内强夯或与其他地基处理相结合的方法。

4.6.17 采用强夯法处理湿陷性黄土地基，土的天然含水率宜低于塑限含水率 1%~3%。当土的天然含水率低于 10%时，宜对其增湿接近最优含水率；当土的天然含水率大于塑限含水率 3%时，宜采用晾晒或其他降低含水措施。

4.6.18 湿陷性黄土地基强夯的有效加固深度或消除湿陷深度，应按现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB50025 通过试夯测试结果确定；以消除湿陷为目的，土的湿陷系数应小于 0.015。也可按本规程式 4.2.1 进行估算。

4.6.19 湿陷性黄土地基强夯处理的夯击能，应根据施工设备、地层地质年代、厚度和要求消除湿陷性黄土的有效深度等因素确定。夯锤底面宜为圆形平面，锤底的静压力宜为 50kPa~100kPa。

4.6.20 采用强夯法处理湿陷性土时，填料不得选用砂石等透水性材料。

4.6.21 盐渍土地基可采用强夯法、强夯置换法、孔内深层强夯进行处理或浸水预溶联合强夯法进行处理。

4.6.22 盐渍土地基的强夯设计，应符合以下规定：

1 强夯置换法墩体材料应采用抗腐蚀、抗盐胀、含盐量低的硬质粗骨料，并应符合本规

程第 4.3.8 条的规定；

- 2 浸水预溶联合强夯法适用于处理厚度较大、渗透性较好的盐渍土；
- 3 场地周围宜设置排碱沟，沟深宜大于 3m。

4.6.23 盐渍土地基强夯有效加固深度，应根据现场试夯或地区经验确定，当无试验资料或经验时可按式 4.2.1 进行估算。

4.6.24 强夯法处理盐渍土，土体含水率可按表 4.6.23 控制，强夯置换法不受此限制。

表 4.6.23 强夯地基含水率 (%)

土质	粉土	粉质黏土	黏土
地基天然含水率	12~22	14~25	15~27

4.6.25 盐渍土地基采用浸水预溶联合强夯法进行处理时，浸水宜采用砂井加漫灌的方式。强夯施工时宜在场地表铺设 1.0m~2.0m 厚的硬质粗骨料垫层，并延长夯击间隔时间。

4.6.26 强夯法和强夯置换法宜避免冬期施工。当不可避免时，应考虑冻土地基冻胀融沉问题时，需进行现场试验验证其可行性，并进行可靠评价。

4.6.27 在季节性冻土地区进入冬季后，当冻土厚度不超过 50cm 时，可进行强夯施工（包括点夯和满夯），来年开春场地完全融化后进行碾压等后续工作；当冻土厚度在 50cm~80cm 时，只进行点夯施工，不可进行满夯施工，在来年开冻后进行满夯和后续其他工作；当冻土厚度超过 80cm 时，不应进行强夯施工。

4.6.28 为确保准确掌握场地冻深及开春后开打时间，宜在场地内开展地温及气温监测，地温监测深度根据项目需要设置；同时，宜探明冻土层土性、含水量、冻结强度、起始冻结温度等信息。开春后，可通过探槽进一步验证融化程度。

4.6.29 对于冻胀敏感性场地，可采用强夯置换法处理冻胀融沉问题，必要时可在强夯后场地铺设 2~5 层土工格栅，每层格栅之间铺设 30cm~50cm 级配良好的砾砂并分层压实，格栅搭接长度在 20cm 以上，上、下层解封错开布置，错开间距不小于 50cm。

5 施工

5.1 一般规定

5.1.1 强夯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 场地岩土工程勘察报告；

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；对于特殊土地区的强夯施工，应根据设计要求、场地条件和施工季节，针对特殊土的特性编制施工组织设计；应合理安排施工程序，防止施工工序不当造成的不利影响；

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 对于强夯置换法应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，按相关要求建立现场坐标平面控制点和高程控制点；

6 施工前，对进入施工现场的设备应进行性能认定，并对夯锤质量、尺寸、落距进行核对确认，对控制落距的牵引钢丝绳进行位置锁定，做出标记。

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。有条件时宜进行现场振动测试，必要时应采取设隔振沟等措施隔振、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 强夯振动对建（构）筑物影响评价的频率范围应为 1Hz~50Hz；建（构）筑结构基础和顶层楼面的振动速度时域信号测试应取竖向和水平向两个主轴方向，评价指标应取三个分量峰值的最大值及其对应的主振频率。强夯振动容许振速可参照表 5.1.4 确定。

表 5.1.4 强夯施工时域范围容许振动速度峰值

建筑物类型	顶层楼面（mm/s）	基础（mm/s）	
	1Hz~50Hz	频率≤10Hz	10<频率≤50Hz
土窑洞、土坯房、毛石房屋	—	4.5	9
工业建筑、公共建筑	24.0	12.0	24.0
居住建筑	12.0	5.0	12.0
对振动敏感、具有保护价值、不能划归上述两类的建筑	6.0	3.0	6.0

注：表中容许振动值按频率线性插值确定。

5.1.5 对于未达到国家现行抗震设防标准的城市旧房和镇（乡）村未经正规设计自行建造的房屋容许振动值，宜按表 5.1.4 中居住建筑的 70% 确定。

5.1.6 对于处于施工期的建（构）筑物，当混凝土、砂浆的强度低于设计要求的 50% 时，应避免遭受施工振动影响；当混凝土、砂浆的强度达到设计要求的 50%~70% 时，其容许

振动值不宜超过表 5.1.4 中数值的 70%。

5.1.7 省级以上(含省级)重点保护古建筑与古迹的安全允许质点振速，必要时宜经专家论证后确定。

5.1.8 强夯振动水平安全距离可通过现场试验或类似场地经验确定；当无试验资料或经验时，可通过 2~3 倍有效加固深度初步评估最小水平安全距离，或采用式(5.1.8)初步估算。

$$V = K\left(\frac{\sqrt{Q}}{R}\right)^\alpha \quad (5.1.8)$$

其中， K 和 α 为与夯击点及振动传播路径有关的系数和衰减指数， Q 为夯击能级（ $t \cdot m$ ）， R 为影响半径（ m ）。

5.1.9 当采用加速度进行振动评价时，应采用可靠标准进行评价，满足相关保护要求。

5.1.10 对于特定环境（如精密仪器和设备等灵敏度高的场所）容许振动值及安全距离，应符合国家相关标准规定，且应通过现场试夯实测结果进行调整。

5.1.11 当强夯施工对人工边坡、海堤、挡墙、桩基等建（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，应设置监测点，并采取隔振或防振措施。

5.1.12 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。

5.1.13 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。

5.1.14 饱和度高的黏性土，为避免橡皮土，应从低能级到高能级逐步进行强夯；在选择强夯法时，优先选用“重锤低落距”的方式，并适当减小锤径。

5.1.15 强夯除应满足 5.1.7、5.1.8 条水平安全距离外，空中安全距离应大于 18.0m；当在高压输电线路附近作业时，应采取限高、避让、防护等安全措施。

5.1.16 特殊土地区的强夯施工，应根据设计要求、场地条件和施工季节，针对特殊土的特性编制施工组织设计。

5.2 施工准备

5.2.1 施工前应向施工人员进行技术、质量交底。

5.2.2 施工区的范围应在强夯处理范围的基础上再增加向外扩展的用以施工设备支撑、转移、回转所需宽度，并了解机具进出场路线、水电、材料、临时设施及限高等现场施工条件。

5.2.3 施工前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、挡土墙和各种地下管网的位置、高程及埋深等，并予以迁移清除或采取必要的保护措施。

5.2.4 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、植物、树木和拆除建（构）筑物基础等，有积水洼地进行排水、清淤。平整后的场地应具有足够的承载能力，能满足机械迁移、作业的要求。

5.2.5 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，保证夯击设备平稳作业。

5.2.6 高水位地基强夯时，地下水位以上必须保持 3.5m 以上的覆盖层厚度（必要时考虑毛细上升高度），夯坑或场地积水应及时排除。当不满足条件时，应铺填一定厚度的松散性材料或采取降水措施。强夯置换场地表土松软时，应铺设 1.0m~2.0m 厚的硬质粗骨料垫层。

5.2.7 应用 20m×20m 方格网测量夯前场地高程,并根据基础埋深和试夯时所测得的夯沉量,确定起夯面高程和夯后高程。强夯点定位允许偏差±50mm,且夯点应有明显标记和编号。

5.2.8 施工所需填料质量、配比、均匀性等指标应符合设计标准;细粒土采用最佳含水率状态。

5.2.9 施工现场可根据周边环境需要设置隔振沟、截水和排水系统。

5.3 施工机具

5.3.1 强夯主机根据设计要求采用强夯专用设备;其有效起吊高度和回转半径应满足施工要求;起重能力应与夯锤质量相匹配;高~超高能级强夯施工时,起重机应配置辅助门架或采取可靠的落锤防机架倾覆安全措施。用于数字化施工的强夯主机还应符合以下要求:

- 1 具有自动化控制系统,支持参数预设(夯击能、夯击次数、落距等)和实时调整;
- 2 配有GPS/北斗定位模块,支持自动记录夯击点位置、夯沉量、夯击能等数据功能;
- 3 配有数据通讯模块,支持数据实时上传至云端或施工管理平台;
- 4 对于接入数字化管理平台的强夯设备,应通过后台验收。

5.3.2 夯锤应采用铸钢制造,一般底面为圆形,重 10t~100t。普通强夯锤宜为圆台型或圆柱型,锤底直径为 2~3m,一般对称设置 4~6 个与其顶面贯通的排气孔(槽),孔径 250~400mm;夯锤底的静压力值一般为 25 kPa~150kPa,地基土颗粒越粗,锤底静压力越大。强夯置换或孔内深层强夯的夯锤可采用长圆柱型或其变型,直径一般为 1~2m,不设排气孔,其锤底静压力值可取 800~300kPa,强夯置换夯锤宜在周边设置排气槽。

5.3.3 采用的脱钩装置必须可靠、灵活,具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,中高能级强夯施工时,应采取措施防止机架倾覆。

5.3.4 应根据工程规模,配备相应型号与数量的推平设备。强夯置换或孔内深层强夯应配备装载机填料。

5.3.5 施工设备安装完成后,应调试和试运转,并进行报验。

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,标出第一遍夯点位置,并测量起夯面高程;
- 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,记录夯坑下沉量;若发生夯锤歪斜情况时,应及时将夯坑底面整平;
- 4 重复步骤 3,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 用推平设备将夯坑推平,并测量场地高程;
- 7 在满足间歇时间后,按上述步骤逐次完成全部夯击遍数;
- 8 最后用低能量满夯,将场地表层松土夯实,并测量夯后场地高程;
- 9 满夯完成后地坪高程低于竣工要求地坪高程时,可铺设垫层,并分层碾压密实。

5.4.2 点式强夯置换按下列步骤施工:

- 1 清理并平整施工场地至夯前高程,标出夯点位置;当表层土松软时,可铺设施工垫层;

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。起锤工况满足时，宜多夯少填料；当夯坑达到一定深度或发生起锤困难时停夯，向夯坑内填料宜为夯坑深度的 1/3~1/2 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；累计夯沉量不应小于设计墩长的 1.5~2.0 倍；

4 换夯点，重复前述步骤，按“由内而外、隔行跳打”的原则完成全部夯点的施工；

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；

6 铺设垫层，分层碾压密实。

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 孔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，采用钻孔、掏孔、冲击成孔或机械挖孔，成孔中心偏差不应超过桩径 1/4，深度允许偏差应为 $\pm 0.5\text{m}$ ，垂直度偏差不应大于孔深 2.5%。

3 向夯孔内填料，填料高度不超过 1.5 倍的锤径，测量夯前锤顶高程并实施夯击。记录夯击次数。然后在夯孔内继续夯击，将填料夯击至原夯孔深度。当遇到缩孔时，可用硬骨料夯填消除塌孔影响。

4 重复前述步骤，反复夯填至停锤标准，完成单个夯点的孔内夯击。

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并稳定后强夯机就位。

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 满夯施工可按下列步骤进行：

1 平整场地；

2 测量场地高程，放出一遍满夯基准线；

3 起重机就位，将夯锤置于基准线端；

4 按照夯印搭接 1/4 锤径或设计要求逐点夯击，完成规定的夯击数；

5 逐排夯击，完成一遍满夯，用方格网测量场地高程；

6 场地整平；

7 测量场地高程，放出二遍满夯基准线；

- 8 按以上步骤完成第二遍满夯;
- 9 平整场地(如果满夯为一遍完成时步骤 7~9 略去)。

5.4.7 喷射井点、轻型井点降水联合低能级强夯法按以下步骤进行:

- 1 平整场地, 设置降水分区;
- 2 安装分区内降排水系统及分区外围封堵系统, 并预埋孔隙水压力计和水位观测管, 进行第一遍降水;
- 3 监测地下水位变化, 当达到设计水位并稳定 1d~2d 后, 拆除分区内的降水系统, 保留外围封堵系统, 然后按夯点布点位置进行第一遍强夯;
- 4 直至满夯作业开始前, 封堵系统应持续运行;
- 5 第一遍夯完后即可插设降水管, 安装降水设备, 进行第二遍降水;
- 6 达到降水要求后, 按照设计的强夯参数进行第二遍强夯施工;
- 7 重复 5、6 步骤, 直至达到设计的强夯遍数;
- 8 拆除分区全部降排水系统, 进行满夯作业;
- 9 全部夯击结束后, 进行场地推平和碾压。

5.4.8 满夯整平后的场地应用压路机将虚土层碾压密实, 并用方格网测量场地高程。

5.4.9 夯击过程中应加强对夯机运行状态的检查与控制, 保证夯机无歪斜、异常晃动。

5.4.10 施工过程中应对各项参数及情况进行监测并详细记录, 包括夯锤质量、落距、夯击范围、夯点复核、夯击次数、每击夯沉量、最后两击平均夯沉量和总夯沉量, 每个夯点施工起止时间等, 孔内强夯置换尚应检查置换深度。

5.4.11 施工中发现异常应及时报告, 会同有关单位查明原因及时处理。

5.5 施工质量控制

5.5.1 施工质量偏差控制应符合下列规定:

- 1 夯点测量定位允许偏差 $\pm 50\text{mm}$;
- 2 夯锤就位允许偏差 $\pm 150\text{mm}$;
- 3 满夯后场地整平平整度允许偏差 $\pm 100\text{mm}$ 。

5.5.2 施工过程中应有专人负责质量检验和监测工作, 并按照表 5.5.2 做好施工记录; 当出现异常情况时, 必须及时会同有关部门妥善解决。

表 5.5.2 强夯地基施工质量检查标准

项	序号	检验项目	允许值或允许偏差数值	检测方法
主控项目	1	地基承载力	不小于设计值	静载试验
	2	地基强度(或压实度)	不小于设计值	原位测试
	3	变形指标	不小于设计值	原位测试
	4	有效加固深度	按设计要求	按规定方法
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	前后两遍间歇时间	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

5.5.3 当不可避免冬期施工时，应符合下列要求：

- 1 强夯冬季施工应根据所在地区的气温、冻深和施工设备性能及施工效益综合确定；
- 2 当最低温度在-15℃以上、冻深在 80cm 以内时，可进行点夯施工，不可进行满夯施工，但点夯的能级与击数应适当增加。气温低于-15℃时，宜停止强夯作业；
- 3 冬季点夯处理的地基，应在解冻后进行满夯，并应考虑冻土层夯入地层中增加的深度，能级应适当增加；
- 4 强夯施工完成的地基如跨年度长期不能进行基础施工，在冬季来临时，应填土覆盖进行保护，避免地基受冻害，覆盖层厚度应大于或等于当地标准冻深。
- 5 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。
- 6 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》（JGJ104）的有关规定要求。
- 7 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。

5.5.4 施工及竣工后的场地均应设置良好的排水系统，防止场地被雨水浸泡，并应符合下列规定：

- 1 在夯区周围根据地形情况开挖截水沟、挡水土坝或砌筑围堰，保证外围水不流入夯区内；在夯区内，规划排水沟和集水井并设水泵及时抽排水；夯坑内有积水，可采用小水泵和软管及时将水抽排在夯区外；
- 2 当天打完的夯坑应及时回填，并整平压实；
- 3 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。当遇暴雨，夯坑积水时，必须将水排除后，挖净坑底淤土，使其晾干或填入干土后方可继续夯击施工。
- 4 雨季强夯施工应及时满夯；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。

5.5.5 在被保护的工程周围应选取下列隔振防振措施：

- 1 设置应力释放孔；
- 2 开挖隔振沟；
- 3 应力释放孔和隔振沟的深度应大于强夯振动速度衰减到满足安全标准时的深度，孔内和沟内可回填锯末、木屑等异性介质；
- 4 在靠近被防护对象的地带，可采取降低强夯能级或分层强夯的措施，还可采取改变施工参数，用小面积夯锤、小夯击能的施工方法。

5.5.6 夯锤气孔堵塞时，尽快疏通；夯击后的坑底有明显歪斜时，向坑底填土垫平。每遍夯击前、后均用方格网测量场地夯沉量，根据测量结果准确控制沉降量。

5.5.7 应对强夯施工危险源、环境因素进行分析辨识，并制定相应的控制方法和应急预案；对所有施工人员进行专项安全教育，并定期进行安全检查。

5.5.8 强夯施工安全应符合以下规定：

- 1 施工场地周边应设置围挡和安全标志；

2 施工场地表层土为碎石土时，宜覆盖黏性土；强夯设备应设置安全防护网及安全警示标志；

3 挂钩、测量人员避让平安距离应大于 30m，并不应小于辅助门架高度；

4 当施工对高压线、地下室、隐蔽管线等设施有影响时，应采取避让和保护措施；

5 遇到大风、雨、雾等能见度低的恶劣天气，不得施工。

5.5.9 强夯施工环境保护应满足以下要求：

1 场地表层土枯燥或为砂类土，强夯前宜洒水湿润；

2 施工场地邻近居民区，休息时段不应施工；

3 强夯振动对周围环境、居民、工程、设施和工作造成影响时，应设置隔振沟和监测点，隔振沟的深度不应小于 2m，隔振沟应安装防护栏杆并设置平安警示标志；

4 施工场地降排水、生活用水应按当地规定进行处理后，排入市政管网；

5 施工期间产生的油污、生活垃圾应集中收集，并按有关规定进行处置。

6 监测、质量检验和验收

6.1 一般规定

6.1.1 强夯地基处理工程的监测、质量检验和验收应由具有相应资质和资格的单位 and 人员进行。

6.1.2 强夯地基处理工程的监测、质量检验和验收应在分析勘察报告、基础设计、地基处理设计、工艺标准、强夯资料、地基处理目的等资料基础上，了解工艺和施工中出现的异常情况，制定监测和检验方案，合理选择检验方法。当采用一种检验方法的结果具有不确定性时，应采用其他方法进行验证。

6.1.3 强夯地基处理工程应进行施工全过程监测。施工中，应有专人或专门机构负责监测工作，随时检查施工记录和计量记录，并应按照规定程序对施工工艺进行质量评定。

6.1.4 检验结果不合格时，应及时进行复检；复检仍不合格的，需采取补强处理或采取其它有效措施，处理完成后重新组织检验验收。

6.1.5 强夯地基质量验收应遵循检验批、分项工程、分部工程的程序，由建设单位组织，施工、设计、监理、检测等单位共同参与，验收资料应完整、规范，符合相关标准要求。

6.1.6 强夯施工前应做好强夯变形、振动、噪声和扬尘可能对周围环境、居民、工程、设施设备和生产造成的影响及风险的评估，并与当地环保部门沟通联系和备案。

6.1.7 除新近高填方等需要一定密实周期的强夯处理地基，一般强夯地基竣工验收后的强夯场地应及时投入使用，不应久置。

6.1.8 强夯地基竣工验收时，应提供下列文件和记录：

- 1 岩土工程勘察报告；
- 2 设计文件、图纸会审记录和技术交底资料
- 3 工程测量、定位放线记录；
- 4 施工组织设计及专项施工方案；
- 5 施工记录及施工单位自查评定报告；
- 6 监测资料；
- 7 隐蔽工程验收资料；
- 8 检测与检验报告；
- 9 竣工图。

6.2 监测

6.2.1 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。

6.2.2 施工过程中应对各项参数及情况进行检查并详细记录：夯锤质量、落距、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、夯击范围、场区平均夯沉量、夯点施工起止时间等，不符合设计要求时，应进行补夯或采取其他有效措施。

6.2.3 对于软土或地下水位较高场地宜设置孔隙水压力传感器或水位观测管，对孔隙水压力或地下水位进行监测，两遍夯击之间，土中超静孔压力消散 75%以上方可进行下一遍夯击。

6.2.4 对于强夯置换施工还应进行置换深度、孔径、垂直度和夯坑置换料填量的监测。

6.2.5 强夯振动对人与建筑物的影响大小主要决定于振动加速度、速度、振幅、频率以

及作用时间等参数。强夯振动监测宜采用振速传感器（或加速度传感器）布置在一定范围内采集频域范围数据，获得振动峰值和持时，并进行频谱分析获得主振频率。

6.2.6 设计监测方案前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，合理布设监测点位，对其竖向及水平方向进行变形监测，必要时进行振动监测；每个振动监测点位应采集不少于两个方向的振动数据，必要时监测土动应力。测振点不应设在浮沙地、草地、松软的地层和冰冻层上。

6.2.7 监测过程中宜做到动态化设计和信息化施工。根据监测数据及时调整优化施工方案。可采用在线自动监测系统，利用测量机器人、北斗系统、GNSS系统、网络通信、智能控制及计算机技术等，实现全天候连续自动监测、监控、分析和预警。

6.2.8 自施工之日起，应对施工场地进行变形稳定性及整体稳定性监测，监测内容包括地表下沉、平移及不均匀倾斜，地下水位、孔隙水压力、夯坑夯沉量、夯坑周边沉降量、侧向位移、深层分层沉降等，地下水位计应布置在距离夯点 20 m 以外的区域。

6.2.9 大面积填土、高填方强夯地基应在施工期间和施工完成后对地基变形进行不少于一个雨季的长期监测，并应依据监测结果验算地基和填筑地基的整体稳定性；对重要的建（构）筑物或对沉降有特殊要求的填筑地基应进行长期监测。监测宜包括下列项目：

- 1 填筑地基顶面沉降监测；
- 2 填筑边坡坡面位移监测；
- 3 填筑地基分层沉降监测；
- 4 填筑地基内部水平位移监测。

6.2.10 对于冻土地带，宜开展地温等监测，必要时通过探槽验证冻深和融化程度，以细化强夯方案。

6.2.11 强夯监测报告内容应包括：工程概况、强夯方案、监测依据和方法、测点布置、实测数据与图形、数据分析（时域、频域、峰值等）、结论。

6.3 质量检验与验收

6.3.1 夯实地基采用分层施工时，每完成一道工序，应按设计要求进行验收检验，未经检验或检验不合格时，不得进行下一道工序施工。

6.3.2 检验点应按随机、均匀和有代表性分布原则布置，重点覆盖地基关键部位、复杂区域及施工异常部位。

6.3.3 强夯地基应进行承载力、密实度及处理深度范围内均匀性检验，强夯置换地基上应查明置换墩的着底情况、密度随深度的变化情况。

6.3.4 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~14d；非饱和的一般黏性土、湿陷性土、粉土地基的休止期宜为 14d~28d；饱和软黏土地基的休止期不宜少于 28d。

强夯置换地基的休止期，对于粉土宜为 21d~28d；对于黏性土宜为 28d。

6.3.5 强夯和强夯置换地基竣工验收质量检验项目，包括主控项目和一般项目。检验项目、允许偏差和检验方法应符合表 6.3.5 的规定。

表 6.3.5 强夯及强夯置换地基竣工验收质量检验项目、允许偏差和检验方法

项	序号	检验项目	允许值或允许偏差数值	检验方法
主控项目	1	地基承载力	不小于设计值	静载试验
	2	地基强度（或压实度）	不小于设计值	原位测试
	3	变形指标	不小于设计值	原位测试

	4	有效加固深度	按设计要求	按规定方法
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)	不小于设计要求	用钢尺量
	8	前后两遍间隙时间	不小于设计值	检查施工记录
	9	最后两击平均夯沉量	不大于设计值	水准测量
	10	场地平整度(mm)	±100	水准测量
	11	起夯标高(m)	±300	水准测量
	12	湿陷性消除情况	有要求时	原位浸水静载试验 或室内试验
	13	液化消除情况	有要求时	原位测试

注：主控项目应按照地基处理的设计要求和不同行业的质量验收标准确定。

6.3.6 强夯和强夯置换地基竣工验收时，检验项目应按不同行业的设计要求和相关验评标准，采用原位测试和室内试验相结合的方法，采用两种或两种以上的方法进行。

1 地基承载力检验应采用静载荷试验、其他原位测试和室内土工试验综合确定，静载荷试验最大加载量不应小于设计要求的承载力特征值的 2 倍，为设计提供依据时应加载至破坏；

2 对湿陷性土地基、一般黏性土地基应采用探井取原状土样，土工分析检测，提供地基承载力、地基强度、变形参数、密实度和湿陷系数等指标，评价地基有效加固深度和黄土的湿陷性消除深度；

3 对砂土、粉土等可液化地基，宜采用标准贯入试验、静力触探试验、黏粒含量测定等，评价液化消除深度，提供地基承载力、地基强度、变形参数等指标；

4 对碎石土、砂石地基、杂填土地基应采用重型动力触探或超重型动力触探、评价地基有效加固深度、土的强度、变形参数和地基承载力等；

5 对分层夯实的填土地基，当采用压实度指标控制质量时，对细粒土可采用环刀法，对粗粒土可采用灌砂法、灌水法进行密实度检测；对土夹石碎石土、块石填土地基可采用固体体积率进行检测，评价地基的均匀性和密实度。

6 盐渍土场地处理后需要采用浸水载荷试验测定溶陷系数和承载力时，应按国家有关规定执行。

6.3.7 强夯地基竣工后承载力的质量检验数量应按不同行业要求、场地复杂程度和工程的重要性确定，对于简单场地上的一般建筑物，每个建筑物地基的载荷试验检测点不应少于 3 点，对于复杂场地或重要建筑地基应增加检验点数，检测结果的评价，应考虑夯点和夯间位置的差异。

强夯置换地基单墩载荷试验数量不应少于墩点数的 1%，且不少于 3 点，对饱和粉土地基，当处理后墩间土能形成 2.0 m 以上厚度的硬层时，其地基承载力可通过现场单墩复合地基静载荷试验确定，检验数量不应少于墩点数的 1%，且每个建筑载荷试验检验点不应少于 3 点。

6.3.8 强夯地基强度、有效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、十字板剪切试验、多道瞬态面波试验等原位测试及室内土工试验相结合的方法检验。检验点的数量可根据场地复杂程度和建筑物的重要性确定。对于简单场地上的一般

建筑物地基，每 400 m² 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 300 m² 不少于 1 个检验点，且总数不少于 3 点。

强夯置换地基可采用超重型或重型动力触探试验等方法，检查置换墩着底情况及密实度随深度的变化，检验数量不应少于墩点数的 3%，且不少于 3 点。

检测深度应满足设计要求，覆盖强夯有效加固深度；确定强夯地基有效加固深度应进行夯前、夯后物理力学性质指标的比照试验，并绘制评价指标随深度的变化曲线图。夯前、夯后检验点应各不少于 3 点。

6.3.9 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位置应按相关规范执行。检测位置宜选在夯后整平面以下 0.5m~0.8m 处进行。

6.3.10 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。

6.3.11 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。

6.3.12 对于孔内深层强夯施工的工程，在施工全过程中应执行逐桩施工、逐桩验收的自检评定制度；自检包括测量放线、隐蔽工程检查与验收、桩及复合地基与桩间土的检测验收等。

6.3.13 对于孔内深层强夯施工质量有疑问的桩，应采用有效的原位测试的方法进行检测；当有漏桩、桩位偏差过大、桩头及槽底等未达到设计要求时，应根据其位置、数量等具体情况，采取相应的补救措施。

附录 A 强夯施工记录

表 A.0.1 强夯施工夯沉量记录

夯击遍数： 编号：

工程名称：		建设单位：									
建筑物名称：		施工单位：									
夯锤质量：_____ (t)		锤底直径：_____ (m)		落距：_____ (m)		施工日期：_____年____月____日					
夯点编号											
总夯沉量(mm)											
最后两击	夯沉量之差(mm)										
	平均夯沉量(mm)										
起算点											
各夯击次数下夯沉量读数 (mm)	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
	6										
	7										
	8										
	9										
	10										
	11										
	12										
	13										
	14										
	15										
	16										
	17										
	18										
	19										
	20										
施工企业参加人员						监理单位参加人员					
施工员： 年 月 日				质检员： 年 月 日				监理工程师：			

施工企业专业技术负责人：

年 月

年 月 日 日

表 A.0.3 强夯施工夯击能记录

编号：

工程名称： 建筑物名称：			建设单位： 施工单位：		
夯锤质量：_____ (t)		锤底直径：_____ (m)	落距：_____ (m)	施工日期：_____年___月___日	
设计高程：_____ (m)	夯前地面高程：_____ (m)	场地平均夯沉量：_____ (cm)			
设计强夯面积：_____ (m ²)	实际强夯面积：_____ (m ²)	累计评价夯击能：_____ (kN·m/m ²)			
起重设备：	锤底直径：_____ (m)	夯锤质量：_____ (t)			
场地地层描述：					
地下水类型、水位高程，是否采取降排水措施及降排水方法：					
夯击遍数	单击夯击能 (Kn·m)	夯击次数 (击)	夯击点数量 (个)	本遍夯面积 (m ²)	平均单位夯击能 (kN·m/m ²)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
.....					
满夯					
施工企业参加人员			监理单位参加人员		
施工员： 年 月 日		质检员： 年 月 日		监理工程师： 年 月 日	
施工企业专业技术负责人： 年 月 日					

表 A.0.4 强夯施工验收记录表

编号：

工程名称：		建设单位：			
施工单位：		施工日期：		年	月 日
建筑物名称					
坐标	E(m)				
	N(m)				
设计高程 (m)					
地面整平高程 (m)	夯前				
	夯后				
平均夯沉量 (mm)					
平均夯击能 (kN·m/m ²)					
实际强夯面积 (m ²)					
施工企业参加人员				监理单位参加人员	
施工员：		质检员：		监理工程师：	
年 月 日		年 月 日			
施工企业专业技术负责人：					
				年 月 日	

表 A.0.5 强夯地基工程检验批质量验收记录表

编号：

单位（子单位）工程名称					
分部（子分部）工程名称		验收部位			
总承包企业				项目经理	
施工单位					
施工执行标准及编号					
主控项目	1	地基承载力	不小于设计值	施工单位检查评定记录	检查结果
	2	地基强度（或压实度）	不小于设计值		
	3	变形指标	不小于设计值		
	4	有效加固深度	不小于设计要求		
一般项目	1	夯锤落距(mm)	±300		
	2	夯锤质量(kg)	±100		
	3	夯击遍数	不小于设计值		
	4	夯击顺序	设计要求		
	5	夯击击数	不小于设计要求		
	6	夯点位置(mm)	±500		
	7	夯击范围（超出基础范围距离）	不小于设计要求		
	8	前后两遍间隙时间	不小于设计要求		
	9	最后两击平均夯沉量	不大于设计值		
	10	场地平整度(mm)	±100		
	11	起夯标高(m)	±300		
	12	湿陷性消除情况	有要求时		
	13	液化消除情况	有要求时		
施工企业参加人员				监理单位参加人员	
施工员： 年 月 日		质检员： 年 月 日		监理工程师：	
施工企业专业技术负责人： 年 月 日					

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

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：

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：

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 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”，非必须按所指定的标准、规范或其他规定执行时，写法为：“可参照……”。

引用标准名录

- [1] 《建筑地基基础设计规范》 GB50007
- [2] 《高填方地基处理技术规范》 GB 51254
- [3] 《湿陷性黄土地区建筑规范》 GB50025
- [4] 《建筑抗震设计标准》 GB/T50011
- [5] 《建筑工程容许振动标准》 GB50868
- [6] 《爆破安全规程》 GB 6722
- [7] 《建筑地基基础工程施工规范》 GB 51004
- [8] 《建筑施工组织设计规范》 GB/T50502
- [9] 《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》 GB18599
- [10] 《复合地基技术规范》 GB/T 50783
- [11] 《钢制储罐地基处理技术规范》 GB/T 50756
- [12] 《地基动力特性测试规范》 GB/T 50269
- [13] 《建筑地基基础工程施工质量验收标准》 GB 50202
- [14] 《土工试验方法标准》 GB/T 50123
- [15] 《岩土工程勘察规范》 GB 50021
- [16] 《建筑地基处理技术规范》 JGJ79
- [17] 《建筑地基检测技术规范》 JGJ340
- [18] 《建筑工程冬期施工规程》 JGJ104
- [19] 《多道瞬态面波勘察技术规程》 JGJ/T 143
- [20] 《强夯地基处理技术规程》 CECS279
- [21] 《强夯地基技术规程》 YS/T 5209
- [22] 《场地振动影响评估标准》 T/CECS 1342
- [23] 《孔内深层强夯法技术规程》 CECS 197

辽宁省地方标准

强夯地基处理技术规程

Technical Specification for Ground Treatment by Dynamic

DB21/T-xxx-202x

Jxxxx-202x

条文说明

目次

1 总则	36
3 基本规定	37
4 设计	39
4.1 一般规定	39
4.2 普通强夯	40
4.3 置换强夯	42
4.4 孔内深层强夯	44
4.5 降水强夯	44
5 施工	46
5.1 一般规定	46
5.3 施工机具	48
5.4 施工作业	48
6 施工监测、质量检测和验收	49
6.1 一般规定	49
6.2 施工监测	49
6.3 质量检测与验收	50
6.4 验收	错误！未定义书签。

1 总则

1.0.2 本条明确了本规程适用范围。

1.0.3 本条规定了强夯地基处理遵循的原则。

1.0.4 本条明确了本规程还应符合其他相关标准的要求。

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。经过一定时间孔隙水压力消散，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。

随着深厚填土地基开发利用需求的不断增加，又提出孔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 本条规定在确定强夯地基处理方案前应完成的工作，其中强调要进行现场调查研究。强夯法不仅仅用在天然地基的处理，现在更广泛用于人工填土地基的处理。近年来大量的人工填土地基，如挖山填沟、挖山填海地基，为解决工程用地的主要途径。人们在大量建造人工地基的时候，也形成了数量不小的人为不良地基，主要表现为以下几种情况：

- 1 不排水、不清淤、不清基的回填地基。
- 2 在未经处理的湿陷性黄土地基上建造填土地基；
- 3 不考虑颗粒级配，不控制粒径，不控制回填分层厚度，随意抛填的块石填土地基；
- 4 有地下径流出露，不采取引流排泄措施回填的填土地基。

以上这些问题不仅给地基处理留下了隐患，同时也增大了地基处理的难度，对于拟采用强夯法处理的人工回填地基，特别要注意这方面的现场调查。

对施工场地进行岩土工程勘察，包括以下内容：

- 1 详细的岩土工程勘察资料包括场地工程地质、水文地质、气象条件，工程平面布置情况，地形地貌情况；掌握土的类型、组成成份、状态、分布范围及厚度等；
- 2 场地地基岩土成分、土石比及颗粒级配等资料；
- 3 场地及周边地下水分布情况，如地下水位，地下水变化规律等；
- 4 施工场地或附近存在特殊性岩土、岩溶地质或采空区等资料；
- 5 工程地质条件复杂的场地或由于设计方案调整等因素导致原有勘察资料不能满足要求时应进行施工勘察。

收集工程场地周围建（构）筑物、管线、环境等情况：

- 1 各种建（构）筑物、地下管网及相关设施的位置、走向、埋设深度等情况；
- 2 对于拟保留的原有地上、地下建（构）筑物及通信、供电、供水、供暖、供气、供油等各种管网应设置醒目标志并在施工过程中予以保护。

3.0.3 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。

3.0.4 强夯施工时产生的振动影响的安全距离的确定，历来是强夯施工中的难题，涉及安全标准的确定、地基土的特性、强夯能级的大小、夯锤的面积大小等诸多因素。如果不进行现场振动测试很难给出确切的依据，但现场振动测试也并不是每项工程都有条件做到，特别是在地基处理方案初步确定阶段就进行现场振动测试也不现实。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。振波在短距离内主要以面波的形式向周围扩散。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，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土层软弱厚度薄、下卧土层坚硬时，振动强度衰减较慢。地基土的特性可根据试夯确定。

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。目前，国内还没有专门的强夯振动安全标准，工程界一般参照现行国家标准《爆破安全规程》GB6722 的相关规定。

爆破振动安全允许标准

序号	保护对象类别	安全允许质点振动速度 v/(cm/s)		
		f≤10 Hz	10 Hz<f≤50 Hz	f>50 Hz
1	土窑洞、土坯房、毛石房屋	0.15~0.45	0.45~0.9	0.9~1.5
2	一般民用建筑物	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0
3	工业和商业建筑物	2.5~3.5	3.5~4.5	4.2~5.0
4	一般古建筑与古迹	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.5
5	运行中的水电站及发电厂中心控制室设备	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.9
6	水工隧洞	7~8	8~10	10~15
7	交通隧道	10~12	12~15	15~20
8	矿山巷道	15~18	18~25	20~30
9	永久性岩石高边坡	5~9	8~12	10~15
10	新浇大体积混凝土(C20): 龄期:初凝~3天 龄期:3天~7天 龄期:7天~28天		2.0~3.0 3.0~7.0 7.0~12	

注: 1 爆破振动监测应同时测定质点振动相互垂直的三个分量。表中质点振动速度为三个分量中的最大值，振动频率为主振频率。
2 选取建筑物安全允许振速时，应综合考虑建筑物的重要性、建筑质量、新旧程度、自振频率、地基条件等因素。
3 省级以上(含省级)重点保护古建筑与古迹的安全允许振速，应经专家论证选取，并报相应文物管理部门批准。
4 选取隧道、巷道安全允许振速时，应综合考虑构筑物的性质、围岩状况、断面大小、爆源方向、地爬振动频率等因素。
5 非挡水新浇大体积混凝土的安全允许振速，可按本表给出的上限值选取。

3.0.5 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。

3.0.6 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。

3.0.7 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 400m²，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 对于粉土、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、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。

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 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。

4.1.4 振动监测可使用振速传感器、振动加速度传感器，分析地面振动与夯击数、距离关系，获得振动衰减规律，确定与周边工程的安全施工最小距离和减振措施。

4.1.5 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。

4.1.10 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。

4.1.11 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。粉质黏土、粉土取 0.25~0.35；砂土、碎石土取 0.30~0.50。

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》（JGJ79）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。单位夯击能（单位面积上施加的夯击能总量）过大会浪费能量，甚至降低地基强度，过小则达不到加固目的。

最佳夯击能可通过夯击过程中孔隙水压力与土的覆盖压力相同来判断。

此外，行业内学者通过现场试验、模型试验等提出了考虑垂重、落距、锤径、土体含水率、土体容重、夯击次数等因素影响的有效加固深度模型，在具体应用中应进行验证可靠性。

强夯法有效加固深度的确定方法与判定标准：参考相关内容

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。对于地下水位高、层状分布的地基条件相对复杂的土层，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。

此外，为控制经济性，强夯不应超过相应强夯能级的单点饱和夯击能。饱和夯击能一般通过监测夯点一定范围内（如 10m 处）夯击数与振动幅值（如加速度幅值）曲线关系确定，定值峰值（如加速度）对应的夯击数为最大夯击数，相应的即饱和夯击能。

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 夯击点布置是否合理与夯实效果有直接的关系。夯击点位置可根据基底平面形状进行布置。对于某些基础面积较大的建筑物或构筑物，为便于施工，可按等边三角形或正方形布置夯点；对于办公楼、住宅建筑等，可根据承重墙位置布置夯点，一般可采用等腰三角形布点，这样保证了横向承重墙以及纵墙和横墙交接处墙基下均有夯击点；对于工业厂房来说也可按柱网来设置夯击点。

夯击点间距的确定，一般根据地基土的性质和要求处理的深度而定。对于细颗粒土，为便于超静孔隙水压力的消散，夯点间距不宜过小。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。当要求处理深度较大时，第一遍的夯点间距更不宜过小，以免夯击时在浅层形成密实层而影响夯击能往深层传递。此外，若各夯点之间的距离太小，在夯击时上部土体易向侧向已夯成的夯坑中挤出，从而造成坑壁坍塌，夯锤歪斜或倾倒，而影响夯实效果。饱和砂土地基的夯点间距是在已经完成的工程设计理论研究和施工基础上确定的，可用于吹填饱和砂土地基强夯设计，但由于工程实测资料较少，待积累一定数量数据后，再调整夯点间距。

若加固面积较小时，建议采用三角形布置形式；若加固面积较大时，在两种布置形式都能满足工程要求时，建议做经济分析后决定采用何种布置形式。在选择强夯法时，优先选用重锤低落距加固地基土。

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。

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》（GB50011）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》（GB50025）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 30cm~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露出地面，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，但强行排挤的阻抗力还是非常大的。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 4000kN·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形锤底部磨损后，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 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、6000KN·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 4~6m。

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 1.5~2.0 倍。

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。

4.3.7 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。

4.3.8 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，必须对最大粒径作出要求。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。

4.3.9 强夯置换时地面不可避免要抬高，特别在饱和黏性土中，根据现有资料，隆起的体积可达填入体积的大半，这主要是因为黏性土在强夯置换中密度改变较粉土少，虽有部分软土挤入置换墩孔隙中，或因填料吸水而降低一些含水量，但隆起的体积还是可观的，应在试夯时仔细记录，做出合理的估计。

4.3.13 对于下部为淤泥，上部为冲填砂的软土地基，碎(砂)石桩联合低能级强夯有突出的加固效果。碎(砂)石桩施工完毕后，其桩头部位有 1m 左右的松动层，同时，碎(砂)石桩的复合地基承载力不是很高。如果在碎(砂)石桩上部回填一定厚度垫层后进行低能级强夯，可有

效地解决冲填砂层及碎(砂)石桩桩头和二次回填层密实度低的问题。

4.4 孔内深层强夯

4.4.1 孔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。第一步先夯击成孔：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4000kN·m。受目前施工能力的限制，加固深度以不超过12m为宜。

孔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。

孔内深层强夯可直接利用废弃建筑混凝土、废砖块等，也可采用破碎的道路混凝土路面板；在炼钢厂附近，可采用钢渣，消除污染，美化环境；在山区附近，可直接开凿山石，方便就地取材，节省运输费用；这种方法可以充分利用所在地的环境条件。此工艺噪声小，对周边环境影响小，可在市区中使用，且因变废为宝，是一种重新处理和利用建筑垃圾的新途径。

4.4.4 在夯击成孔过程中，夯孔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。

4.4.8 孔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。

4.4.9 孔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。

4.4.10 因为孔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 降水强夯法主要适用于地下水位较高、含水量偏大的饱和软黏土、粉土、粉质黏土、素填土等地基，在常规强夯易出现夯坑翻浆、液化、挤土、效果差的场地，通过降水降低地下水位与土体含水率后，再实施强夯，可显著提高加固效果与施工效率。

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 1~2 排井点，间距宜为 1~2m。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 2~4 遍施工。

4.6 特殊土的强夯处理

4.6.1 对于下部为淤泥，上部为冲填砂的软土地基，增设竖向排水体强夯有突出的加固效果。碎（砂）石桩竖向排水体作为有效的排水通道，能有效缩短强夯间歇时间，同时，碎（砂）石桩在满夯作用下改善其桩头密实度低的问题，可适度按复合地基考虑地基承载力。

砂井、袋装砂井和塑料排水带，有助于超静孔隙水压力消散，有效缩短强夯间歇时间。

4.6.3 软土地基强夯先低能级在场地地表形成硬层，保证机械设备行走和施工，再高能级强夯加固深部土层。采用高能级强夯需考虑破坏地表硬层消耗能量对加固深度的影响。

4.6.9 竖向排水体材料为碎石或砂石混合料，直径宜大于 300mm；砂井、袋装砂井和塑料排水带作为竖向排水体，宜按等边三角形或正方形均匀布设。

4.6.10 人工填土地基强夯处理时，应注意强夯振动对填土边坡的不利影响，强夯应距边坡顶部一定距离，一般大于 20m，防止强夯时填土侧移，影响强夯加固效果，并对填土边坡的稳定造成不良影响。

人工填土地基强夯处理时，当填土厚度较大时，已经填筑完成的场地因强夯影响深度有限，应对强夯影响深度以下填土采取其他方法进行处理；未填筑场地宜分层填筑分层强夯，填筑厚度一般控制在 5m~7m。

4.6.12 因开山造陆、围海造田等填土工程越来越多，特别是对深厚填土，规程强调了应在回填前清表清淤、夯实原地基土，再分层回填、分层夯实、分层检测验收，合格后再进行下一道工序施工的处理原则。

4.6.13 人工填土强夯地基的回填成分复杂、粒径不均匀的块石和碎石土回填地基，在填筑时必须分层堆填，禁止抛填。分层堆填的厚度可根据运输车辆的吨位，取 0.8m~1.2m。由于强夯加固深度并不随着夯击能的增高而按比例增长，高能级、超高能级强夯施工设备体积较大且笨重，行走不便。对于高填土场地，设备运行转移难度大，故高填土地基强夯不宜采用高能级和超高能级，宜采用能级较低的分层强夯加固法，高能级和超高能级强夯适用于一次性回填处理的厚度大的填土地基。国内工程近年多采用的强夯能级为 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $4000\text{kN}\cdot\text{m}$ 和 $6000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，故在表中只提供了这三种能级强夯的填土分层厚度。

4.6.14 通过压实、夯实对深厚填土处理形成的地基，一般会改变场地水环境，地表水或地下水可能对处理后的地基产生不利影响，因此应对处理后的建筑地基进行水稳性评价，并考虑地下水位变化对工程的影响。填土的水稳性与其土性、密实度和渗透性密切相关。当干密度达到一定的高值时，其透水性明显减小，地下水对填土的强度和模量的衰减变化影响很小，从而提高了填土的水稳性。对于分层压实和夯实的填土地基，只要回填土级配良好、含水量适宜、施工工艺合理可靠、质量控制严格，可以达到较高的密实度和水稳性。

对深厚填土地基，除了需对填土底平面以下的软弱土层进行清表清淤和必要的密实处理、

设置盲沟等地下排渗系统以及地表设置截排水措施外,还应有序回填,分层夯实提高填土的密实程度。在此类场地上建筑物的建造时间、顺序及加荷速率应结合拟建建筑物的基础型式和变形控制等要求并根据填土处理完成后地基的实测变形趋势综合确定。

4.6.16 湿陷性黄土地基强夯效果的检验,宜采用钻探、井探、原位测试及室内试验等方法综合进行,考虑取样、运输、试验条件、数据处理等因素,个别土样的湿陷系数大于0.015,应考虑湿陷起始压力综合判定。

对于湿陷土层、含水率偏低、土质坚硬的超厚湿陷性黄土地基,应采用以下施工措施:按照最优含水量进行增湿;按照增大夯点间距、高能级、多击数、隔排隔点施工原则设计;以夯坑深度为夯击质量控制标准,第一、第二遍的夯坑深度宜大于5m,第三、第四遍的夯坑深度宜大于4.5m。

对于饱和度较高的湿陷性黄土地基,应采用低能级、少击数、多遍主夯、先低能级后高能级的原则进行施工;利用含水率低的表层土采用强夯置换法。

4.6.18 盐渍土是指易溶盐含量大于或等于0.3%且小于20%,并具有溶陷、盐胀、腐蚀等工程特性的土。

强夯和强夯置换法适用于处理以溶陷性为主的盐渍土,对以盐胀性为主的盐渍土不宜采用该法。

强夯和强夯置换法处理后可以改善土的力学性质、消除或减小地基因浸水而引起的溶陷,提高地基的承载力和减小地基变形。

强夯法和强夯置换法虽然目前在盐渍土地基得到了应用,但由于强夯工艺目前还没有较为成熟的计算方法,所以在盐渍土地区采用该工艺时,应通过现场试验确定其适用性和处理效果。场地周围设置排碱沟是为了防止水位起伏形成次生盐渍土。

4.6.26 强夯冬期施工时,冻结土块尤其温度越低的冻土,可夯实性越差,夯击后可能呈多孔堆积状态,其次,冻胀性土料进入持力层待融化后,会造成不均匀融沉变形,影响加固地基质量,因此,不应将冻结基土或回填的冻土块夯入地基的持力层,回填土质量及越冬维护符合JGJ/T104的有关规定。

冻土加固深度可通过以下经验公式估算:

$$h = \frac{k\sqrt{W \cdot H}}{V\alpha}$$

式中: h 为有效加固深度, k 为3~5的系数, W 为夯锤重量(t), H 为落距(m), V 为纵波波速(m/s), α 为能力吸收系数。松软饱和粉细砂、粉土、黏土的 α 在0.01~0.03之间,纵波速度为60m/s;较湿的粉土、黏土 α 值在0.04~0.08之间,纵波波速在100m/s;稍湿的和干的黏土、粉土 α 值在0.09~0.15之间,纵波波速在100~200m/s;硬塑的黏土和中密的块石、碎石 α 在0.20~0.34之间,纵波波速在200~250m/s之间;可塑的黏土和中密的粗砂、砾石 α 在0.35~0.50之间,纵波波速在300~400m/s。

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》（GB50868）的相关规定来确定安全距离。

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)	
	1 Hz~50 Hz	1 Hz~10 Hz	50 Hz
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 能级强夯压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。

同时，应采取避免结构物出现振动“鞭梢效应”。

当以机构类型的振动标准作为控制标准，《动力机器基础设计规范编说明》中规定：对松散砂土要求， $\alpha_{\max} \leq 0.1g$ ，对黏土要求 $\alpha_{\max} < 0.2g$ 。结合项目重要性程度，两个指标综合判断，而非一个指标控制。

根据《中国地震烈度表》2020 震感与加速度与速度分类标准判定。同时要考虑建（构）筑本身抵抗能力（如石砌、钢筋混凝土等）

原冶金部《机器动荷载作用下建筑物承重结构的振动计算和隔震设计规程》（冶金工业建筑研究总院，1990）中，规定了工作和生活环境的允许振动速度限值。中震对应的地震动加速度峰值是小震对应加速度峰值的 3 倍。多遇地震（小震）和罕遇地震（大震）对应的地震动加速度峰值，其中多遇地震对应的地震动加速度峰值用于验算结构弹性极限状态，罕遇地震对应的地震动加速度峰值用于验算结构的塑性极限状态。故采用设防烈度下多遇地震（小震）对应的地震动加速度峰值作为结构最小安全距离评判标准更为准确。

强夯产生的冲击波分为体波（P 波、S 波）和面波（瑞利波、勒夫波）2 种。体波率先到达，但携带的能量较少，同时体波的衰减速度快；面波传播速度慢，衰减速度相对较慢，且携带的能量大，对建筑物的影响大。面波中，瑞利波携带的能量占其总波能的 2/3，对激振源附近地表附着物的破坏力较大。因此，减小瑞利波能量是降低夯击作业对建筑物影响的有效途径。

防震沟深度对减震效果影响显著，沟宽度对减震效果影响不大；在实际工程中，综合考虑具体施工条件与经济因素，可将减震沟深度设置为 4m 左右

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。

5.1.8 根据《地基动力特性测试规范》，振动一般呈负指数型衰减规律。

根据《强夯振动影响与构筑物安全距离研究》，对于不敏感的建（构）筑物，振动加速度衰减到 0.1g 时对建筑物几乎没有危害，可用 $S=K(Wh)^{0.5}$ 评估安全距离。K 取 1.1~1.3，此处 $E=Wh$ 为强夯能级，单位为吨·米。

Woods 曾通过大量的现场隔振试验，认为：隔振沟的最小深度应在 1.2~1.5 个瑞利波（R 波）波长 λ_R 左右，而隔振沟的宽度对隔振效果没有实质上的影响。

5.3 施工机具

5.3.2 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 1.0~3.0，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。

5.3.3 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》（JGJ104）允许冬期强夯施工，但《建筑地基处理技术规范》（JGJ79）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》（JGJ104）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 监测、质量检验和验收

6.1 一般规定

6.1.5 强夯后的地基如不及时进行基础施工，长期遭受雨水浸泡、冻融，将会导致地基强度严重降低，丧失地基处理加固的效果。

6.2 监测

6.2.5 强夯振动主振频率是评价振动对周边建（构）筑物影响的一个重要参数。不同于一般的人工振源，如列车振源振动频谱在 0.05~20Hz 范围内，平坦且信号频带较宽；强夯振动频率明显集中。此外，通过频谱分析发现高能级强夯振动频率与一般中低能级强夯相比，主振频率更低。值得注意的是普通建筑物的固有频率一般为 10Hz 以下，因此高能级强夯振动可能引起更强烈的建筑物破坏。

当夯锤举起后，仪器进入采集状态，连续采集，记录强夯振动全过程。由于目前尚未形成评估强夯振动效应对建（构）筑物危害判别的统一标准，因此参考与强夯振动效应相近的天然地震和人工爆破的规范，作为衡量强夯振动对周围建筑物影响的标准。

强夯引发的地面振动持时较短，且呈现为脉冲型地面运动。其中垂向地面运动峰值随振源距的衰减较快，而水平向的地面运动峰值则随振源距的衰减较慢。大部分动能将使土体产生振动，振动波根据其传播的不同可分为体波和面波，所谓的体波是指在土体内部传播的振动波，其传播特点是向多个方向进行传播；面波为在土体介质表面传播的振动波，它是由振动波发生边界效应而产生的波。体波进一步分类又可分为横波和纵波，横波简称 S 波（剪切波），纵波简称 P 波（压缩波）。面波通常位于边界附近，面波是由 P 波和 S 波传到边界附近发生边界效应而产生的波；面波进一步分类可分为瑞利波和勒夫波，瑞利波简称 R 波，勒夫波简称 L 波。其中压缩波占振动能量的 7%，剪切波为 26%，瑞利波所占的比例最大

约 67%。瑞利波是强夯施工对周边环境产生振动影响的主要能量。振动加速度峰值与夯击次数的关系可由一元二次方程加以近似描述。

6.2.6 国外对振动的评价标准有多种，常见的有振动强度法、质点振动功率法和时程曲线反应谱法等。由于近距离衰减快，远距离衰减慢，由此划分为振动破坏区（一般 5m 范围内）、振动损坏区（5~50m）及相对安全区（50m 以外）。因此，一般布点密度由近（0~15m）及远（15m 以外）逐渐减小（例如，0~5m 范围 1~2m 间距布点，5~15m 范围 2~5m 布点，15m 范围以外间距 5m 以上）。振动实测表明，强夯引起的夯点振动是瞬时冲击振动，振动频率约 5~20Hz，振动持续时间一般不超过 1s。锤土接触的时间约为 0.04~0.1s，并为三角形波形。

根据《多道瞬态面波勘察技术规程》，通过场地不同深度波速反映强夯效果，从而确定有效加固深度。强夯振动监测最大加速度法是确定单点夯击试验最大夯击数和强夯加固有效深度的有效方法之一，也间接确定了饱和夯击能。

6.3 质量检验与验收

6.3.1 强夯分遍施工、强夯置换分层填料夯实，均属分层工序，需要逐遍/逐层验收，严禁跳序施工，确保每道工序质量可控。

6.3.4 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。

6.3.6 本条依据《建筑地基处理技术规范》（JGJ79）和《建筑地基基础工程施工质量验收标准》（GB50202）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。

6.3.7 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。