

中国工程建设标准化协会标准

强夯地基处理技术规程

Technical Specification of Dynamic Consolidation to Ground
Treatment

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

强夯地基处理技术规程

Technical Specification of Dynamic Consolidation to Ground Treatment

CECS 279:2010

主编单位：山西省机械施工公司

山西建筑工程（集团）总公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2010 年 11 月 1 日

中国计划出版社

2010 年 北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会[2008]98 号文的要求，由山西省机械施工公司和山西建筑工程（集团）总公司会同有关的勘察、设计、施工、研究和教学单位组成了强夯地基处理技术规程编写组。

强夯 1965 年由法国梅纳公司创立，1978 年引入我国，本规程是在深入调查研究，认真总结国内三十年的强夯施工经验和科研成果的基础上编写的。

本规程主要技术内容是：1 总则；2 术语、符号；3 基本规定；4 设计；5 施工；6 质量检测。

本规程由中国工程建设标准化协会负责管理，由主编单位负责技术内容的解释。

主编单位：山西省机械施工公司（地址：山西省太原市杏花岭区胜利街 1 号，邮编：030009）。

山西建筑工程（集团）总公司

参编单位：太原理工大学

同济大学

中国电力工程顾问集团西南电力设计院

中国电力工程顾问集团西北电力设计院

江西省电力设计院

北京交通大学

赛鼎工程有限公司

山西省电力勘测设计院

内蒙古新大地集团

山西省高原岩土工程勘察检测公司

主要编写人员：安 明 张循当 叶观宝 崔江余 李保华 杨印旺

刘淑芳 肖美跃 余凤先 张旭红 贾军刚 贺武斌

王 丰 张建民 李锋瑞 唐学峰 郭伟林 李英涛

闫续屏 岳效宁 马建国 王 悦 岳晓宏 薛文兵

目 次

1	总 则	1
2	术 语、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	强 夯 法	7
4.3	强 夯 置 换 法	8
4.4	特殊土地基强夯地基处理	10
4.5	人工填土地基强夯地基处理	11
5	施 工	17
5.1	一般规定	17
5.2	施工场地准备	17
5.3	施工机具	18
5.4	施工程序	18
5.5	施工质量控制与检测	21
5.6	环境保护	22
6	质 量 检 测	23
6.1	强夯法地基处理质量检测	23
6.2	强夯置换法地基处理质量检测	23
	本规程用词说明	26
	引用标准目录	27
	条文说明	28

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Basic Requirement	4
4	Design	6
4.1	General Requirement	6
4.2	Dynamic Compaction	7
4.3	Dynamic Replacement	8
4.4	Non Complete Dynamic Replacement	10
4.5	Special Rock-soil Foundation Dynamic Consolidation	11
4.6	Artificial Refilling Foundation Dynamic Consolidation	15
5	Construction	17
5.1	General Requirement	17
5.2	Preparation of Construction Site	17
5.3	Construction Machine	18
5.4	Construction Procedure	18
5.5	Construction Quality Control	21
5.6	Environmental Protection	22
6	Quality Test	23
6.1	Construction Quality Test	23
6.2	Completion Acceptance Test	23
6.3	Test Monitoring Points	25
	Explanation of Wording in this Code	26
	Quoted Code	27
	Provision Explain	28
	Additional Explanatory Note	50

1 总 则

1.0.1 为了在强夯地基处理的设计、施工和质量检测中，贯彻执行国家的技术经济政策，做到技术先进、安全适用、经济合理、确保质量、保护环境，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于天然地基、人工填土地基和特殊土地基的强夯地基处理的设计、施工和质量检测。

1.0.3 强夯地基处理除应符合岩土工程勘察和设计要求外，尚应做到因地制宜、就地取材、施工安全、环境保护、节约资源等。

1.0.4 强夯地基处理工程除应符合本规程外，尚应符合现行国家的有关标准的规定。

2 术语、符号

2.1 术 语

2.1.1 强夯地基处理 dynamic consolidation

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，将地基土夯实的地基处理方法。

2.1.2 强夯法 **强夯地基处理技术规程**

2.1.3 强夯置换法 dynamic replacement

采用长鼓形夯锤，对地基土反复夯击的同时间断地向夯坑内回填砂石、钢渣等硬质骨料，除饱和粉土外，形成穿透整个软弱土层的密实墩体的地基处理方法。

2.1.4

2.1.5 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的加固深度。

2.1.6 山区地基 foundation of mountainous area

分布于山区的地基，一般具有地基不均匀和边坡稳定性差的问题。

2.1.7 大块石填土地基 filling foundation of big block stone

填土材料为块石（粒径大于 200mm 的颗粒含量超过全重的 50%以上，最大粒径不超过 800mm）的地基。

2.1.8 盐渍土地基 saline soil foundation

含有较多易溶盐类（易溶盐含量大于 0.3%）的地基。

2.1.9

2.1.10 固体体积率 solid volume ratio

土中固体颗粒的体积占总体积的百分比。

2.1.11 锤底接地静压力 the pressure of hammer

静止状态下夯锤重量与锤底面积的比。

2.2 符 号

b ——湿陷性黄土增湿时注水方格网边长；

H ——夯锤落距；

h ——强夯地基加固深度；

I_L ——液性指数；

I_p ——塑性指数；

S_r ——饱和度；

W ——锤的质量；

w_s ——生石灰的降水率；

\bar{w} ——含水量加权平均值；

$\overline{w_{op}}$ ——最优含水量加权平均值；

α ——强夯加固深度的修正系数；

$\bar{\rho}_d$ ——加固深度范围内不同土层干密度加权平均值。

3 基本规定

3.0.1 强夯地基处理可根据加固原理、适用条件和施工工艺划分为强夯法和强夯置换法两种类型。

3.0.2 确定强夯地基处理方案应具备下列条件：

- 1 详细的岩土工程勘察资料，上部结构及基础设计资料；
- 2 对于人工填土地基，应详细了解填土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、清淤等情况；了解填土的岩土成分、土石比及颗粒级配等；
- 3 根据工程的要求和地基存在的主要问题，确定强夯地基处理的目的，处理范围和处理后要求达到的各项技术经济指标；
- 4 结合工程情况，了解当地强夯地基处理施工经验和施工情况，对于有特殊要求的工程，尚应了解其它地区相似场地上同类工程的处理经验和使用情况等；
- 5 搜集临近建筑、地下工程和有关管线等情况；
- 6 掌握工程场地周围的环境情况。

3.0.3 在选择强夯地基处理方案时，应考虑上部结构、基础和地基的相互作用，并经过技术经济比较，选用强夯地基处理地基或加强上部结构和强夯地基处理地基相结合的方案。

3.0.4 对已确定的强夯地基处理方案，宜按工程地基基础设计等级和场地复杂程度，在有代表性的场地上进行相应的现场试验或试验性施工，并进行必要的测试，以检验设计参数和处理效果，如达不到设计要求时，应查明原因，修改设计参数或调整地基处理方案。

3.0.5 强夯地基处理可与其它地基处理方法组合形成联合地基处理方案。

3.0.6 经强夯地基处理后的地基，当按地基承载力确定基础底面积及埋深，而需对本规程确定的地基承载力特征值进行修正时，应符合下列规定：

- 1 基础宽度的地基承载力修正系数应取零；
- 2 基础埋深的地基承载力修正系数应取 1.0。

经处理后的地基，当受力层范围内仍存在软弱下卧层时，尚应验算下卧层的地基承载力。

3.0.7 按地基变形设计或应作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。

3.0.8 受较大水平荷载或位于斜坡上的工程，当建造在处理后的地基上时，应进行地基稳定性验算。

3.0.9 施工过程中应有专人或专门机构负责工程监理，施工结束后必须按本规程规定或国家有关规定进行施工质量检验和验收。

3.0.10 复合地基载荷试验应符合国家现行标准的有关规定。

3.0.11 对需进行地基变形计算的工程，经强夯地基处理后应进行地基沉降观测，并符合国家现行标准的有关规定。

4 设 计

4.1 一般规定

4.1.1 强夯地基处理可用于机场、道路、港口、堆场、储罐、仓储和工业与民用建筑等工程场地的地基处理。

4.1.2 采用强夯法处理的地基，应进行强夯试验；采用强夯置换法处理的地基，必须通过现场试验，确定其适用性和处理效果，确定合适的强夯设计参数和施工参数。

4.1.3 强夯试验应达到以下要求：

- 1 确定地基有效加固深度，确定处理后地基土的强度、承载力和变形指标；
- 2 确定合适的夯击能、夯锤尺寸和落距等施工参数；
- 3 校核强夯后场地的沉降量或抬升量，为确定起夯面标高提供依据；
- 4 确定夯点间距、夯击次数、夯击遍数、最后两击夯沉量和间隔时间等设计参数；
- 5 确定强夯施工停夯标准等施工质量控制指标；
- 6 了解强夯施工振动、侧向挤压等对周边环境和工程的影响，确定与周边工程的安全施工最小距离。

4.1.4 试验区数量应根据场地复杂程度、工程规模、工程类型及施工工艺等确定，强夯试验面积不应小于 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 。根据初步确定的强夯参数，提出强夯试验方案，进行现场试夯。应根据不同土质，待强夯结束一至数周后，对试夯场地进行检测，并与夯前测试数据进行对比，检验强夯效果，确定工程采用的各项强夯参数。

4.1.5 强夯的能级可按以下标准划分：

- 1 低能级： $500\text{kN} \cdot \text{m} \sim 4000\text{kN} \cdot \text{m}$ ；
- 2 中等能级： $4000\text{kN} \cdot \text{m} \sim 6000\text{kN} \cdot \text{m}$ ；
- 3 高能级： $6000\text{kN} \cdot \text{m} \sim 8000\text{kN} \cdot \text{m}$ ；
- 4 超高能级：大于 $8000\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

4.1.6 强夯地基处理过程中应做到动态化设计和信息化施工。

4.2 强夯法

4.2.1 强夯法适用于处理碎石土、砂土、非饱和细粒土、湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基的处理，对含有良好透水性夹层的饱和细粒土地基应通过试验后采用。

对于采用桩基的湿陷性黄土地基、可液化地基、填土地基、欠固结地基，可先用强夯法进行地基预处理，然后再进行桩基施工。

4.2.2 强夯法的有效加固深度应根据现场试夯或当地经验确定；在初步设计时，可按公式 4.2.2 估算；在缺少试验资料或经验时，也可根据《建筑地基处理技术规范》（JGJ79）和《湿陷性黄土地区建筑规范》（GB50025）有关规定预估。

$$h = \alpha \sqrt{WH} \quad (4.2.2)$$

式中： h ——有效加固深度，m；

W ——锤的质量，t；

H ——落距，m；

α ——有效加固深度修正系数，与土质、含水率、锤型、锤底面积、工艺和设计标准等多种因素有关。

按经验取值时：

- 1) 可液化砂土地基 α 取 0.45（应给一个幅度）；
- 2) 湿陷性黄土地基 α 取值见表 4.5.11；
- 3) 粘性土地基，当 $S_r < 60\%$ 时，取 0.4；

4.2.3 强夯夯点布置形式可根据基础形式、地基土类型和工程特点选用，宜为正方形、矩形、正三角形、等腰三角形等形式。

4.2.4 夯点间距宜为锤径的 1.2~2.5 倍，低能级时取小值，高能级及考虑能级组合时取大值。

4.2.5 强夯法施工工艺设计应根据处理要求、地基土类型、经济技术比较，可采用以下两种形式组合：

- 1 按点夯、复夯、满夯的工艺组合。
 - 1) 点夯可一遍完成，也可以隔行或隔行隔点分遍完成。
 - 2) 当点夯夯坑深度过大时，应增加一遍复夯，复夯能级可取主夯能级的一

半，或按夯坑深度确定。

2 按不同能级组合时，采用高能级处理深层，中等能级处理中间层，低能级处理浅层，满夯处理表层的组合。

4.2.6 夯点的夯击次数应按现场试夯确定的夯击次数和夯沉量关系确定，并应同时满足下列条件：

- 1 最后两击平均夯沉量不宜大于设计值；
- 2 夯坑周围地面不应发生过大的隆起；
- 3 不因夯坑过深发生提锤困难。

4.2.7 最后两击夯沉量平均值不宜大于下列数值：

当单击夯击能小于 4000kN.m 时为 50mm；当单击夯击能为 4000kN.m～6000kN.m 时为 100mm；当单击夯击能大于 6000kN.m 时为 200mm。（放入条文说明）

4.2.8 两遍夯击之间应有一定的时间间隔，间隔时间根据地基土的渗透性决定，对于渗透性好的地基可连续夯击。

4.2.9 满夯能级应根据点夯后地表扰动层的厚度确定，满夯可一遍或隔行分两遍完成，夯击时点与点之间宜搭接 1/4 锤径。满夯的击数可根据地基承载力特征值的设计要求确定，当地基承载力特征值在 150kPa～250 kPa 时，满夯击数不宜低于 3 击～5 击。

4.2.10 满夯后的地表应加一遍机械碾压，以满足地基土的压实度要求。

4.2.11 强夯地基处理范围应大于工程基础范围，每边超出外缘的宽度宜为基础下设计处理深度的 1/2 至 2/3，并不宜小于 3m。

4.2.12 强夯法应预估地面的沉降量，并在试夯时予以校正。根据场地夯后的沉降值和夯后地面的整平设计标高确定场地起夯面标高。夯后的地面整平标高应根据场地的使用要求、基坑开挖时的土方平衡确定，宜高于基底设计标高 0.5m 以上，低于室外地坪设计标高 0m～0.8m。（增加条文说明，叙述预估沉降量的方法及量）

4.2.13 强夯法地基承载力特征值应通过现场载荷试验确定，初步设计时可根据试夯后原位测试和土工试验指标按现行国家标准有关规定确定。

4.2.14 强夯地基变形计算应符合现行国家标准的有关规定，夯后有效加固深度内土层的压缩模量应通过原位测试或土工试验确定。

4.3 强夯置换法

4.3.1 强夯置换法适用于处理高饱和度的粉土与软塑状的淤泥、淤泥质土、粘性土等地基，用于对变形控制要求不严的工程中。

4.3.2 强夯置换墩的深度由土层条件决定，除饱和粉土外，应穿透软土层到达硬质土层上，置换墩体深度不宜超过 7m。

4.3.3 强夯置换法的单击夯击能和置换深度应通过试验确定。

4.3.4 强夯置换法的夯锤直径宜为 1.0m~1.5m，锤底接地静压力可取 100kPa~200 kPa。

4.3.5 墩体材料可用级配良好的块石、碎石、矿渣、建筑垃圾等坚硬粗颗粒材料，粒径大于 300mm 的颗粒含量不宜超过全重的 30%。

4.3.6 夯点的夯击次数应通过现场试夯确定，并应同时满足下列条件：

- 1 墩体穿透软弱土层，且达到设计墩长；
- 2 累计夯沉量为设计墩长的 1.5~2.0 倍；
- 3 最后二击平均夯沉量不大于本规程第 4.2.7 条的规定。

4.3.7 墩位布置宜采用等边三角形或正方形。对独立基础或条形基础可根据基础形状与宽度相应布置。

4.3.8 墩间距应根据荷载大小和原土的承载力选定，当满堂布置时可取夯锤直径的 2~3 倍，对独立基础或条形基础可取夯锤直径的 1.5~2.0 倍。墩的计算直径可取夯锤直径的 1.1~1.2 倍。

4.3.9 当墩间净距较大时，应适当提高上部结构和基础的刚度。

4.3.10 强夯置换处理范围应按本规程第 4.2.11 条的规定。

4.3.11 墩顶应铺一层厚度不小于 500mm 的压实垫层，垫层材料可与墩体相同，粒径不大于 100mm。

4.3.12 强夯置换设计时，应预估地面抬高值，并在试夯时校正，起夯面标高和夯后整平标高可按 4.2.12 条确定。

4.3.13 强夯置换法试验方案的确定，应符合本规程 4.1.4 条的规定

4.3.14 确定饱和软土强夯置换处理后的地基承载力特征值时，可只考虑墩体，不考虑墩间土的作用，其承载力应通过现场单墩载荷试验确定；对饱和粉土地基可按

复合地基考虑，其承载力可通过现场单墩复合地基载荷试验确定。

4.3.15 强夯置换地基的变形计算，应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》（GB50007）的有关规定。复合土层的压缩模量可按下式计算：

$$E_{sp} = [1 + m(n-1)]E_s \quad (4.3.15)$$

式中： E_{sp} —复合土层压缩模量（MPa）；

E_s —桩间土压缩模量（MPa），宜按当地经验取值，如无经验时，可取天然地基压缩模量；

m —面积置换率；

n —桩土应力比，在无实测资料时，对粘性土可取 2~4，对粉土可取 1.5~3，原土强度低取大值，原土强度高取小值。

4.4 强夯半置换法

4.4.1 强夯半置换法适用于处理厚度较大、饱和度较高的湿陷性黄土、红粘土和一般粘性土地基。

4.4.2 强夯半置换的单击夯击能和置换后的处理深度应通过现场试验确定。

4.4.3 强夯半置换宜采用普通夯锤，锤底直径 2.0~2.5m，锤底接地静压力宜为 40kPa~100 kPa。

4.4.4 强夯半置换墩体深度应达到饱和土层处理深度的 1/2~2/3。

4.4.5 墩体材料可采用级配良好的块石、碎石、矿渣和建筑垃圾等坚硬粗颗粒材料，填料中粒径大于 300mm 的颗粒含量不宜超过全重的 30%。

4.4.6 夯点的夯击次数应通过现场试夯确定，同时应满足下列条件：

- 1 累计夯沉量应为设计墩长的 1.5~2.0 倍。
- 2 最后两击的平均夯沉量不大于本规程 4.2.7 条的规定。

4.4.7 墩位布置宜采用等边三角形或正方形。对独立基础或条形基础可根据基础形状与宽度相应布置。

4.4.8 墩间距应根据荷载大小和原土的承载力选定，当满堂布置时可取夯锤直径的 2~2.5 倍，对独立基础或条形基础可取夯锤直径的 1.5~2.0 倍。

4.4.9 当墩间净距较大时，应适当提高上部结构和基础的刚度。

4.4.10 强夯半置换处理范围应按本规程第 4.2.11 条执行。

4.4.11 墩顶应铺一层厚度不小于 500mm 的压实垫层，垫层材料可与墩体相同，粒径不大于 100mm。

4.2.12 强夯半置换设计时，应预估地面抬高值，并在试夯时予以校正，起夯面标高和夯后整平标高可按 4.2.12 条确定。

4.4.13 强夯半置换法试验方案的确定，应符合本规定 4.1.4 条的规定。

4.4.14 强夯半置换地基承载力特征值可按复合地基确定，墩体与墩间土的承载力应分别通过现场载荷试验确定。复合地基承载力可按下式计算：

$$f_{spk} = mf_{pk} + (1-m)f_{sk} \quad (4.4.14)$$

式中： f_{spk} —强夯半置换地基承载力特征值（kPa）；

f_{pk} —地基载荷试验确定的墩体承载力特征值（kPa）；

f_{sk} —地基载荷试验确定的墩间土承载力特征值（kPa）；

m —墩体面积置换率。

4.4.15 强夯半置换地基的变形计算应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》（GB50007）的有关规定。变形指标压缩模量可按置换段和非置换段分别确定，置换段复合土层压缩模量的计算可按本规程 4.3.15 条计算；非置换段压缩模量应通过经强夯半置换处理后的原地基土土工试验和原位测试确定。

4.5 特殊土地基强夯处理

4.5.1 特殊土地基包括软土地基、湿陷性黄土地基和山区地基等。

4.5.2 软土地基处理可采用强夯置换法、降水联合低能级强夯法、竖向排水体联合强夯法和碎（砂）石桩联合强夯等方法处理。

4.5.3 软土地基采用强夯置换法时，应符合本规程 4.3 的规定。

4.5.4 软土地基采用降水联合低能级强夯法时，适用于处理渗透系数在 $i \times 10^{-3} \text{cm/s} \sim i \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 的中细砂～粉土地基。

4.5.5 软土地基强夯宜采用低能级、少击数、多遍夯、先轻后重的原则进行施工，宜采用 2～4 遍进行夯击，单击夯击能可从 400kN.m 逐渐增大到 2000 kN.m 以上，

具体工艺参数应通过试夯来确定。

4.5.6 降水联合强夯地基处理应根据处理面积、处理深度和降水设备容量划分成若干个各自独立的降水系统，小区外围 3m~4m 处布置的封堵井点宜为 1~2 排，井点间距宜为 1m~2m。小区内按设计加固深度、土体渗透性确定井点密度和井管深度、降水时间、降水深度。井点布置成长方型或正方型网络。

4.5.7 软土地基大面积强夯地基处理前，应结合勘察报告进行暗浜排查，并将沟浜塘换填。对于地质条件特殊，且无经验的场地应选择有代表性的区域进行试夯，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、夯击数和间隔时间等设计参数。

4.5.8 软土强夯地基变形计算包括有效加固深度范围内的沉降和加固区下卧层的沉降，有效加固深度内土层的压缩模量应通过原位测试或土工试验确定。

4.5.9 碎（砂）石桩联合强夯适用于下部为软土、冲填土地基，上部为碎石填土的地基。上部填土应在碎（砂）石桩施工完成后回填，然后进行强夯。

4.5.10 竖向排水增强体联合强夯法应符合下列规定：

1 竖向排水增强体的深度应根据建筑物对地基的稳定、变形要求确定，并不宜大于 8m。对以地基抗滑稳定性控制的工程，竖向排水增强体至少应超过最危险滑动面 2m；

2 地表铺设与竖向排水增强体材料相近的砂垫层，垫层厚度不应小于 500mm；

3 砂垫层所用砂料宜为中粗砂，粘粒含量不宜大于 3%，砂料中可混有少量粒径大于 50mm 的砂石，其渗透系数宜大于 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ ；

4 强夯能级不宜大于 3000kN.m，强夯形成的夯坑应采用和砂垫层相同的砂料回填。

4.5.11 湿陷性黄土地基强夯的有效加固深度（消除湿陷深度）可按《湿陷性黄土地区建筑规范》GB50025 确定，也可按公式 4.2.2 估算，式中修正系数 α 按表 4.5.11 取值。

表 4.5.11 湿陷性黄土 α 值

粉土 ($I_p \leq 10$)			粉质粘土 ($I_p > 10$)		
I_L	α 取值范围	备注	I_L	α 取值范围	备注

$I_L < 0$	0.35~0.45	I_p 小时取大值, I_p 大时取小值	$I_L < 0$	0.20~0.30	I_L 绝对值大时取 小值, I_L 绝对值 小时取大值
$I_L > 0$	0.45~0.5	I_L 小时取小值, I_L 大时取大值。	$0 \leq I_L < 0.25$	0.36~0.45	I_L 小时取小值, I_L 大时取大值。
			$0.25 \leq I_L < 0.5$	0.45	

4.5.12 强夯地基处理湿陷性黄土地基的单位面积夯击能, 应根据施工设备、黄土地质年代、湿陷性黄土层的厚度和要求消除湿陷性黄土层的有效深度等因素确定。宜取 $1000 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}^2 \sim 4000 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}^2$ 。

4.5.13 采用强夯法处理湿陷性黄土地基, 土的天然含水量宜低于塑限含水量 $1\% \sim 3\%$ 。在拟夯实的土层内, 当土的天然含水量低于 10% 时, 宜对其增湿接近最优含水量; 当土的天然含水量大于塑限含水量 3% 以上时, 宜采用晾晒或其它降低含水量的措施。

4.5.14 对于湿陷土层厚度超过 14m 、含水量偏低、土质坚硬的超厚湿陷性黄土地基, 应采用以下施工措施:

- 1 增湿法;
- 2 大夯距、多批次、隔行隔点施工;
- 3 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 。

4.5.15 对于含水量低于最佳含水量的湿陷性黄土地基, 强夯前按以下方法采取增湿措施:

按一定间距的方格网点并在中心加一点的布孔方式钻孔 (一般以洛阳铲成孔), 孔中灌砂后, 向孔中定量注水, 将处理厚度内的含水量增至接近最优含水量, 每孔注水量按下式计算。

$$V = \frac{0.5 \times (\bar{w}_{op} - \bar{w}) \times b^2 h \bar{\rho}_d}{\rho_w} \quad (4.5.15)$$

式中 V ——每孔注水量 (m^3);

\bar{w} 、 \bar{w}_{op} ——分别为润湿土体厚度 h 内土层的天然含水率加权平均值和最优含水率加权平均值, 以小数计;

b ——注水孔方格网边长 (m), 可取 1~2m;

h ——加水增湿的土层厚度;

$\bar{\rho}_d$ ——增湿厚度内土层天然干密度加权平均值 (g/cm^3);

ρ_w ——水的密度, 取 $\rho_w=1\text{g}/\text{cm}^3$ 。

4.5.16 对于饱和度较高的湿陷性黄土地基, 强夯前可采取以下方法降低含水量:

按一定间距的方格网点并在中心加一点的布孔方式钻孔 (一般以洛阳铲成孔), 孔中填入生石灰块, 将处理厚度内土体的含水量降至接近最优含水量, 每孔填灰量按下式计算:

$$V = \frac{0.5 \times (\bar{w} - \bar{w}_{op}) \times b^2 h \bar{\rho}_d}{w_s \rho_w} \times 1100 \quad (4.5.16)$$

式中 V ——每孔填灰量 (kg);

\bar{w} 、 \bar{w}_{op} ——分别为处理深度土体厚度 h 内土层的天然含水率加

权平均值和最优含水率加权平均值, 以小数计;

b ——灌灰孔方格网 (m) 边长, 可取 1.5~2m;

h ——需降低含水量的土层厚度;

$\bar{\rho}_d$ ——降湿厚度内土层天然干密度加权平均值 (g/cm^3);

ρ_w ——水的密度, 取 $\rho_w=1\text{g}/\text{cm}^3$ 。

w_s ——每 kg 生石灰的降水率, 可取 0.6~0.75。

4.5.17 山区地基存在以下几种情况时, 可采用强夯地基处理: (和条文说明交换)

- 1 原地基存在软弱土层和软弱夹层;
- 2 存在断层破碎带;
- 3 分层回填的填土地基;
- 4 对石芽密布的岩溶地基, 用回填料将石芽覆盖后, 采用大能量强夯, 破碎石芽, 夯实石芽间红粘土与填土;
- 5 处理岩溶漏斗、洼地, 将漏斗、洼地用回填料回填后, 采用强夯加固夯实;
- 6 对顶板不厚的溶洞, 可用强夯破坏顶板, 回填石料后, 夯实加固。

4.6 人工填土地基强夯处理

4.6.1 人工填土强夯地基的填料选择应满足以下要求：

- 1 级配良好的粗粒料；
- 2 性能稳定的工业废料、建筑垃圾；
- 3 以粉质粘土、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 潮湿多雨地区的填土地基不宜采用成份单一的粉质粘土、粉土作填料，应掺入不少于 30%的粗骨料，即土石比不宜大于 7：3；
- 5 不得使用淤泥、耕土、冻土、强膨胀岩土及有机质含量大于 5%的土；
- 6 大块石填土材料最大粒径不应大于 800mm。
 - 1) 泥岩、页岩、板岩等易软化、泥化岩石可作为地下水以上部位填土地基的材料。在气候湿润、雨量丰富的地区，适用于排水条件良好的高填土地带。
 - 2) 砂岩、泥岩等易风化岩作为填土材料，应考虑地基发生渗透变形和渗透破坏的可能性，并制定相应的控制标准和措施。

4.6.2 人工填土地基原地基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和软弱土层。
- 2 回填场地原地基软弱土层的处理可采用抛石挤淤、强夯置换、挖除换填、振冲桩等方法。可根据现场工程地质条件、水文地质条件，进行经济技术比较，择优选用。
- 3 当原地基需要加固时，其天然坡度在 1：5~1：2.5 之间的，应将天然地面开挖成倒坡台阶形状，台阶宽度不应小于 2m；其天然坡度陡于 1：2.5 的，应验算地基整体稳定性。

4.6.3 块石、碎石填土地基除抛石填海和抛石挤淤地基外，碎石、块石填土地基均采用分层堆填，禁止抛填。分层堆填的厚度可取 0.8 m~1.2m。

4.6.4 当填土区有地下迳流、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。

4.6.5 回填地基地表应设置截水、排水设施。

4.6.6 填土地基的填土厚度可按强夯有效加固深度确定，当填土厚度过大时，应将填土分层回填分层强夯。填土分层厚度按表 4.6.6 确定。

表 4.6.6 填土地基的强夯有效加固深度

单击夯击能级(kN·m)	控制填土厚度(m)
3000	4
4000	6
6000	8

4.6.7 人工填土地基分层强夯应符合下列规定：

1 易软化、泥化岩石填土地基宜采用强夯法。当填土地基遭受雨水、洪水较长时间浸泡，地基土高度饱和，岩块软化、泥化严重时可采用强夯置换处理；（放入条文说明）

2 在气候湿润雨水丰富的地区，易软化、泥化岩块填土地基，应及时回填，及时强夯，不宜久置和长期受雨水浸泡，受水浸泡后的泥岩填土地基表层软化层在强夯时应予以去除。

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 强夯试验的有关资料，当地有关强夯施工的经验资料。

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 对粘性土地基、湿陷性黄土地基，必要时测定地基处理深度内的含水量；
- 3 对填土地基详细了解填土的成分、构成、级配和土石比等；
- 4 做必要的颗粒分析、固体体积率、击实试验，确定填土粗颗粒料的粒径控制和级配，以及细颗粒料的最大干密度和最佳含水量，为填土的夯实提供质量控制依据；
- 5 对山区地基应了解地下迳流、泉水和裂隙水的出露情况，并作好记录，标出坐标位置；
- 6 设置测量控制网，建立现场坐标平面控制点和高程控制点。

5.1.2 强夯施工振动对周围建筑物和环境的影响评估和安全施工距离应通过现场试夯振动测试确定，也可按当地施工经验确定安全距离。强夯振动对工程影响的安全标准，可按国家标准的有关规定确定。

5.1.3 强夯施工侧向挤压水平变形对人工边坡、海堤、挡墙等构筑物产生的影响应通过现场强夯试夯施工深层水平位移测试确定，安全施工距离可按照施工经验和现场变形监测确定。

（放入基本规定 3.0.3 后）

5.2 施工场地准备

5.2.1 根据经验或强夯试验结果，预估场地夯后下沉量（或抬升量），根据建筑物

基础埋深确定场地起夯面标高，挖填、平整场地至起夯面标高。施工场地应平整，并能承受强夯机械的重力；施工前，必须查明施工区周围及场地范围内需保护的建筑物、地下构筑物、挡土墙和地下管线等的位置及标高等，并采取必要的保护措施。

5.2.2 清除场地耕植土，污染土及有机物质。

5.2.3 强夯置换和强夯半置换在清理和平整场地后，当表土松软时，应铺设 1.0m~2.0m 厚的硬质粗骨料垫层。

5.2.4 高水位地基强夯时，地下水位以上必须保持厚度 2.5m 以上的覆盖层，当不满足这一条件时，应铺设硬质粗骨料垫层或采用降水措施。

5.2.5 应用 20m×20m 方格网测量夯前场地标高。

5.2.6 施工场地可根据需要设置排水系统。

5.3 施工机具

5.3.1 根据设计要求的强夯能级，选用带有自动脱钩器装置、与夯锤质量相匹配的履带式起重机或其它专用设备。中、高能级强夯施工时，起重机宜配门架或采取其它措施，防止落锤时机架倾覆。

5.3.2 脱钩器的设计应保证强度和耐久性，结构形式应轻便灵活、易于操作。

5.3.3 夯锤底面宜为圆形，重心应在中垂线上，且低于 1/2 夯锤高度，夯锤底面积宜按土的性质确定，锤底静接地压力值可取 25kPa~40kPa，高能级强夯，锤底接地压力值可增加至 80kPa，强夯夯锤宜按底面积大小，均匀设置 4~6 个直径 250mm~500mm 上下贯通的排气孔。强夯置换夯锤宜在周边设置排气槽。夯锤质量应有明显、永久的标志。

5.4 施工程序

5.4.1 强夯法施工可按下列步骤进行：

- 1 清理并整平施工场地；
- 2 标出第一遍夯点位置，测量场地高程；
- 3 夯机就位，起吊吊钩至设计落距高度，将吊钩牵引钢丝绳固定，锁定落距；
- 4 将夯锤平稳提起置于夯点位置，测量夯前锤顶高程；

- 5 起吊夯锤至预定高度，夯锤自动脱钩下落夯击夯点；
- 6 测量锤顶高程，记录夯坑下沉量；
- 7 重复步骤 5~6，按设计的夯击数和控制标准，完成一个夯点的夯击；
- 8 夯锤移位到下一个夯点，重复步骤 2~5，完成第一遍全部夯点的夯击；
- 9 用推土机将夯坑填平或推平，用方格网测量场地高程，计算本遍场地夯沉量；
- 10 在规定的间歇时间后，按以上步骤完成全部夯击遍数；
- 11 满足间歇时间后，进行满夯施工。

5.4.2 强夯置换法施工可按下列步骤进行

- 1 清理并平整施工场地，当表层土松软时，铺设一层厚度为 1.0m~2.0m 的砂石类施工垫层；
- 2 标出第一遍夯点位置，用白灰洒出夯位轮廓线，并测量场地高程；
- 3 夯机就位，起吊吊钩至设计落距高度，将吊钩牵引钢丝绳固定，锁定落距；
- 4 将夯锤平稳提起置于夯点位置，测量夯前锤顶高程；
- 5 起吊夯锤至预定高度，夯锤自动脱钩下落夯击夯点，并逐击记录夯坑深度。当夯坑过深发生提锤困难时停夯，向坑内填料至与坑顶齐平，记录填料数量。如此重复直至满足规定的夯击次数及控制标准，完成一个墩体的夯击。当夯点周围软土挤出，影响施工时，可随时清除，并在夯点周围铺垫碎石，继续施工；
- 6 按由内而外、隔行跳打原则，完成本遍全部夯点的施工；
- 7 用方格网测量场地高程，计算本遍场地抬升量。当抬升量超过场地设计标高时，应用推土机将超高的部分推除；
- 8 在规定的间隔时间后，按上述步骤完成下遍夯点的夯击。

5.4.3 满夯施工可按以下步骤进行：

- 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 锤径的原则逐点夯击，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）；
- 10 用方格网测量场地高程。

5.4.4 用压路机将满夯整平后的虚土层碾压密实，用方格网测量场地高程。

5.4.5 采用真空降水时，真空泵排气量应不小于 100L/s，系统真空度应达到 65 kPa~90kPa，单级降水深度应达到 6m~8m。

5.4.6 每套系统所带的井管数量由设计真空度高低而定。埋设降水井管时，井孔深度应比井管深 0.5m~0.6m，井管与井壁之间及时用中粗砂回填灌实，并用粘土封孔口，防止漏气。

5.4.7 降水联合低能级强夯法按以下步骤进行：

- 1 平整场地，安装设置降排水系统及封堵系统，并预埋孔隙水压力计和水位观测管，进行第一遍降水；
- 2 监测地下水位变化，当达到设计水位并稳定至少两天后，拆除场区内的降水设备，保留封堵系统，然后按夯点布点位置进行第一遍强夯；
- 3 一遍夯后即可插设降水管，安装降水设备，进行第二遍降水；
- 4 按照设计的强夯参数进行第二遍强夯施工；
- 5 重复 3、4 步骤，直至达到设计的强夯遍数；
- 6 全部夯击结束后，进行推平和碾压。

5.4.8 人工填土地基施工按以下步骤进行：

- 1 场地清理；
- 2 回填场地原地基处理；
- 3 填土地基回填和强夯地基处理；

5.5 施工质量控制与检测

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 $\pm 5\text{cm}$ ；
- 2 夯锤就位允许偏差 $\pm 15\text{cm}$ ；
- 3 满夯后场地整平平整度允许偏差 $\pm 10\text{cm}$ ；

5.5.2 施工过程中应有专人负责下列监测工作：

- 1 施工前检查夯锤质量和落距，确保单击夯击能符合设计要求；
- 2 在每一遍施工前，应对夯点放线进行复核，夯完后检查夯坑位置，发现偏差或漏夯应及时纠正；
- 3 按设计要求检查每个夯点的夯击次数和最后两击的夯沉量，对强夯置换、强夯半置换尚应检查置换深度；
- 4 施工过程中应对各项参数及施工情况进行详细的记录。

5.5.3 施工与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，应符合以下规定：

- 1 在夯区周围根据地形情况开挖截水沟或砌筑围堰，保证外围水不流入夯区内，在夯区内，规划排水沟和集水井。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 当天打完的夯坑及时回填，并整平压实；
- 3 如遇暴雨，夯坑积水，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。

5.5.4 强夯在冬季施工时，应采取以下措施，保证强夯地基处理效果：

- 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，满夯应在解冻后进行，满夯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，覆盖层厚度应大于等于当地标准冻深。

5.5.5 竣工验收后的强夯场地应及时投入使用，不应久置。

5.5.6 强夯竣工面应防止重型车辆碾压。

5.6 环境保护

5.6.1 强夯施工前应做好强夯振动、噪声和扬尘可能对周围环境、居民、工程、设

施设备和工作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，并制定防护措施。

5.6.2 在被保护的工程周围应采取以下隔振防振措施：

- 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。

6.1 施工质量检测（移至 5.5）

6.1.1 应检查施工过程中的各项测试数据和施工记录，不符合设计要求时应补夯或采取其它有效措施，检测项目按表 6.1.1 的规定执行。强夯置换施工中可采用超重型或重型圆锥动力触探检测置换墩的着底情况。

表 6.1.1 施工质量检验项目

序号	检查项目	允许偏差或允许值		检测方法
1	夯锤落距	mm	±300	钢尺量，钢索设标志
2	锤重	kg	±100	称重
3	夯击遍数及顺序	设计要求		计数法
4	夯点间距	mm	±500	钢尺量
5	夯击范围（超出基础宽度）	设计要求		钢尺量
6	间歇时间	设计要求		
7	夯击击数	设计要求		计数法
8	最后两击平均夯沉量	设计要求		水准仪

6 质量检测和验收

6.1 强夯处理质量检测和验收

6.2 强夯置换质量检测和验收

6.2.1 强夯地基竣工验收质量检测项目，包括主控项目和一般项目，并符合表 6.2.1 的规定。

表 6.2.1 强夯地基竣工验收质量检验标准

项	序号	检查项目	允许偏差或允许值		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	地基强度	设计要求		按规定方法
	2	地基承载力	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	锤重	kg	±100	称重
	3	夯击遍数及顺序	设计要求		计数法
	4	夯点间距	mm	±500	钢尺量
	5	夯击范围（超出基础范围距离）	设计要求		钢尺量
	6	前后两遍间歇时间	设计要求		

表中加模量和有效加固深度？

6.2.2 强夯地基处理后的地基竣工验收承载力检验，应在施工结束后间隔一定时间进行；对碎石土和砂土地基，其间隔时间可取 7d~14d；粉土、粘性土地基，其间隔时间可取 14d~28d；强夯置换、半置换地基，其间隔时间可取 28d。

6.2.3 强夯地基处理后的地基竣工验收时，承载力检验应采用原位测试和室内土工试验。强夯置换后的地基竣工验收时，承载力检验除应采用单墩载荷试验检验外，尚应采用重型动力触探或超重型动力触探等手段查明置换墩着底情况及承载力与密度随深度的变化。对饱和粉土地基允许采用单墩复合地基承载力试验代替单墩载荷试验。强夯半置换地基竣工验收时，承载力检验应分别对墩体和墩间土采用载荷试验，计算复合地基承载力特征值，并用重型动力触探等手段查明地基的

墩体置换深度。

6.2.4 强夯地基质量检测应按照设计要求参照相关规范采用两种以上的原位测试方法进行。

6.2.5 对湿陷性黄土地基，应采用探井取原状土样，土工分析检测土样的含水量、密实度、压缩系数、湿陷系数等指标，并评价黄土地基的湿陷性。

6.2.6 对砂土、粉土液化地基应采用标准贯入试验、粘粒含量测定，评价场地均匀性、密实度、承载力、液化消除深度、液化指数等指标。

6.2.7 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、现场密实度检验，评价场地均匀性、密实度及承载力。

6.2.8 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，评价地基的均匀性及密实度。对块石填土地基应采用固体体积率测试，评价地基的均匀性及密实度。

6.2.9 对不易按常规方法进行检测的碎石土、砂石地基、混合土地基，也可采用面波法进行检测。

6.3 检测布点

6.3.1 强夯地基竣工后的地基强度或承载力检验总数量应符合现行国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收规范》（GB50202）的有关规定。地基强度或承载力检验的各个单项检测点数可按 6.3.2~6.3.5 条执行，并应符合现行国家标准《建筑地基处理技术规范》（JGJ79）的有关规定。

6.3.2 对于简单场地上的一般建筑物，每个单位工程地基的载荷试验不应少于 3 点，对于复杂场地或重要建筑地基应增加检验点数。

6.3.3 强夯置换地基载荷试验和置换墩着底情况检验数量均不应少于墩点数 1%，且不应少于 3 点。

6.3.4 采用静力触探、重型动力触探检测单位工程不应少于 3 点；1000m² 以上、3000 m² 以内工程，每 300 m² 至少应有 1 点；3000 m² 以上工程，超出 3000 m² 部分 500 m² 至少应有一点。

6.3.5 采用探井、钻孔取样、标准贯入试验，单位工程不应少于 3 点；1500 m² 以上、3000 m² 以内工程，每 500 m² 至少应有 1 点；3000 m² 以上工程，超出 3000 m² 以上部分每 600 m² 至少应有 1 点。

6.3.6 采用环刀法、灌砂法、灌水法进行密实度、固体体积率检测时，单位工程不应少于 3 点；每 100 m² 不应少于 1 个点；1000 m² 以上工程，超出 1000 m² 部分每 200 m² 至少有一点，；纵向分层检测点的间距应小于 2m。

6.3.7 采用面波法检测时，每单位工程不应少于 2 个剖面线。效果评价应采用夯前、夯后原位对照检测的方法进行。

6.3.8 夯后检测面应选在夯后整平面下一定深度（0.5m~0.8m）进行。

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，采用“可”。

2、条文中指明应按其他有关标准执行的，写法为“应按……执行”或“应符合……的要求（或规定）”。

引用标准目录

- 1 《建筑地基基础设计规范》(GB50007)
- 2 《建筑抗震设计规范》(GB50011)
- 3 《岩土工程勘察规范》(GB50021)
- 4 《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025)
- 5 《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB50202)
- 6 《爆破安全规程》(GB6722-2003)
- 7 《建筑地基处理技术规范》(JGJ79)
- 8 《公路路基施工技术规范》(JTJ033-95)
- 9 《电力工程地基处理技术规程》(DL5024)
- 10 《碾压式土石坝设计规范》(SL274)
- 11 《民用机场飞行区土(石)方与道面施工技术规范》(MH5014)
- 12 《民用机场飞行区工程竣工验收质量检验评定标准》(MH5007)
- 13 《公路路面基层施工技术规范》(JTJ034)

中国工程建设标准化协会标准

强夯地基处理技术规程

Technical Specification of Dynamic Consolidation to Ground Treatment

(CECS ××:2010)

条文说明

目 次

3	基本规定	31
4	设计	33
4.1	一般规定	33
4.2	强夯密实法	33
4.3	强夯置换法	36
4.4	强夯半置换法	36
4.5	特殊性岩土地基强夯	37
4.6	人工回填建造地基强夯	39
5	施工	41
5.1	一般规定	41
5.3	施工机具	45
5.5	施工质量控制	46
6	质量检测	47
6.2	竣工验收检测	47
6.3	检测布点	48

Contents

3	Basic Requirement	31
4	Design	33
4.1	General Requirement	33
4.2	Dynamic Compaction	33
4.3	Dynamic Replacement	36
4.4	Non Complete Dynamic Replacement	36
4.5	Special Rock-soil Foundation Dynamic Consolidation	37
4.6	Artipicial Refilling Foundation Dynamic Consolidation	39
5	Construction	41
5.1	General Requirement	41
5.3	Construction Machine	45
5.5	Construction Quality Control	46
6	Quality Test	47
6.2	Completion Acceptance Test	47
6.3	Test Monitoring Points	48

3 基本规定

3.0.1 《建筑地基处理技术规范》(JGJ79) 将强夯分为以下两类:

1 强夯法, 适用于碎石土, 砂类土, 低饱和度 ($S_r < 60\%$) 的粉土与粘性土, 湿陷性黄土, 素填土和杂填土等地基。

2 强夯置换法, 适用于高饱和度、软塑-流塑状的淤泥、淤泥质土、粉土、粘性土等对变形控制要求不严的工程。

我国高等学校土木工程专业基础工程有关教材对强夯加固机理分为三类:

1 动力密实

强夯加固多孔隙、粗颗粒、非饱和土是基于动力密实的机理, 即用冲击型动力荷载使土中的孔隙体积减小, 土体变得密实, 从而提高地基土的强度, 非饱和土的夯实过程, 就是土中的气相被挤出的过程。

2 动力固结

动力固结理论是梅纳本人提出的, 梅纳认为:

由于土中存在微小气泡, 孔隙水具有压缩性;

由于冲击力的反复作用, 孔隙水压力上升, 地基发生液化;

由于裂隙土接近液化或处于液化状态, 还由于细粒土的薄膜水有一部分变为自由水, 土的透水性增大;

由于静置, 孔隙水压力降低, 土的触变性恢复。

强夯法处理细颗粒饱和土, 即饱和度较高的粘性土、湿陷性黄土就是基于这一固结机理。但这一机理在很长时间内, 在强夯实践中并没有明显效果。

3 动力置换

动力置换可分为整体置换和桩式置换。整体置换是采用强夯将碎石整体挤入淤泥中, 其作用机理类似于换土垫层法; 桩式置换是通过强夯将碎石土填筑土体中, 部分碎石墩间隔地夯入土中, 形成桩式或墩式的碎石桩(墩)。其作用机理类似于振冲法等形成的碎石桩, 它主要靠碎石摩擦角和墩间土的侧限来维持桩体的平衡, 并与墩间土起复合地基的作用。

山西省机械施工公司在多年的工程实践中, 在对强夯机理及施工方法总结的基础上, 将强夯分为三类, 包括:

1 强夯密实法

相当于动力密实法

2 强夯置换法

强夯置换法是山西省机械施工公司上世纪 80 年代末在武钢龙角湖四烧软土地基处理试验中形成的一种方法，由我国著名土力学专家刘惠珊总结，并写入《建筑地基处理技术规范》中。

3 强夯半置换法（即动力固结法）

单纯的动力固结法，很长时间以来只有理论意义，而没有实际意义，在工程实际中由于孔隙水消散时间过长，或大面积施工时，排水路径被封死，而失去了实用意义，但利用动力固结原理，通过在夯坑中加硬质粗颗粒填料，建立排水通道，使地基土夯坑周围与夯坑底的孔隙水就近转移，加快土层固结，使得动力固结原理在工程实践中有了应用价值。

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，现在更大量用于人工回填建造地基的处理。近年大量的人工建造地基，如挖山填沟、挖山填海地基，成为解决建筑用地的主要途径。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 有地下迳流出露，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。

3.0.5 两种或多种地基处理方法组成的综合地基处理方案往往是处理复杂地基或特殊性岩土地基的最佳选择。强夯法联合其他地基处理方法可以形成多种形式的组合方案。

4 设计

4.1 一般规定

4.1.1 强夯的采用，应注意建筑物对地基承载力和变形的要求。当地基土为低饱和度和细粒土，透水性好、硬质粗颗粒土，建筑物对地基承载力和变形要求较高时，可采用强夯密实法。并根据处理深度要求，采用不同能级。我国电力系统河南三门峡火电厂和山西河津发电厂 300MW 发电汽轮机组厂房就建造在 8000kN·m 高能级强夯地基处理后的黄土地基上。

4.1.5 采用强夯法处理后的湿陷性黄土地基、砂土可液化地基、回填土地基和欠固结地基可有效消除负摩阻力，减轻和消除湿陷、震陷、液化对桩基的有害影响。对于新近回填的欠固结填土地基，在采取强夯加固后，可有效减轻和避免钻孔灌注桩成孔过程中塌孔事故的发生。

4.1.6 强夯能级的划分标准和夯点最后两击夯沉量平均值的要求保持一致。

4.2 强夯密实法

4.2.1 低饱和度的细粒土地基采用强夯密实法处理后的地基承载力特征值可达 200 kPa~250kPa，最大可达 280kPa，压缩模量可达 13MPa~18MPa，最大可达 20MPa；粗颗粒的碎石土、砂土地基采用强夯密实法处理后的地基承载力特征值可达 250kPa~300kPa，最大可达 350kPa。

4.2.2 强夯密实法的有效加固深度是地基土经强夯地基处理后，地基承载力、变形指标、密实度及其他物理力学指标满足设计要求的深度，对一些特殊性岩土地基应满足特定的要求。

1 湿陷性黄土地基

采用强夯密实法处理湿陷性黄土地基，在有效加固深度内，土的湿陷系数 δ_s 均应小于 0.015。

2 存在液化土层的地基

1) 全部消除液化沉陷时，采用强夯密实法处理液化土层地基，有效加固深

度应处理至液化深度下界。

- 2) 部分消除液化沉陷时, 处理深度应使处理后的液化指数减小, 当判别深度为 15m 时, 其液化指数不宜大于 4; 当判别深度为 20m 时, 其液化指数不宜大于 5。

3 填土地基

- 1) 填土地基在有效加固深度内应满足压实度、强度和变形指标要求。
- 2) 易风化、软化、泥化岩块石填土地基有效加固深度内架空大孔隙结构应消除, 其特征指标宜采用加固后地基的固体体积率表示, 固体体积率宜大于 82%。
- 3) 硬岩块石填土地基, 地基有效加固深度内固体体积率宜大于 78%。

4 有效加固深度的确定方法有试夯法、经验法, 估算法、查表法等, 试夯法最为可靠, 但需要一定的时间和经济投入, 对重大工程应通过强夯试验来确定, 当在同一类型地基有较丰富的工程实践经验时, 也可用当地经验确定有效加固深度。在缺少经验或试验资料时, 可按《建筑地基处理技术规范》(JGJ79) 表 6.2.1 确定。

《建筑地基处理技术规范》(JGJ79) 表 6.2.1

单击夯击能 (kN.m)	碎石土、砂土 等粗颗粒土	粉土、粘性土、湿陷性、 黄土等细颗粒土
1000	5.0~6.0	4.0~5.0
2000	6.0~7.0	5.0~6.0
3000	7.0~8.0	6.0~7.0
4000	8.0~9.0	7.0~8.0
5000	9.0~9.5	8.0~8.5
6000	9.5~10.0	8.5~9.0
8000	10.0~10.5	9.0~9.5

注: 强夯法的有效加固深度应从最初起夯面算起。

4.2.3 夯点布置可按以下几种情况考虑:

- 1 根据基础形式布点, 可采用等腰三角形、矩形等形式, 并应符合以下要求:
 - 1) 调整夯点间距, 使基础柱距为夯距的整数倍。
 - 2) 保证基础重心位置或轴线上有夯点, 同时基础外扩宽度符合本规程 4.2.11 条的规定。
- 2 不考虑基础形式布点

宜采用正三角形、正方形布点。

3 湿陷性黄土地基布点

湿陷性黄土地基布点宜采用对称、均匀性较好的正三角形、正方形布点，有利于平面上湿陷性的全部消除，当采用矩形、等腰三角形等不对称形式布点时，侧向加固的效果不均匀，间距较大，中心点位置的湿陷性有可能消除不完全。

4.2.4 当布点形式为正三角形和正方形时，夯点间距取值可参考表 1 的数据。

表 1 不同能级夯点间距经验值

能级 (kN.m)	锤底面积 m ²	锤底直径 m	夯点间距 m	为锤径倍数
1000	4~5	2.25~2.52	3.0	1.2~1.3
2000	5	2.52	3.5~4.0	1.587
3000	5	2.52	4.0~4.5	1.786
4000	5	2.52	4.5~5.0	2.0
5000	5	2.52	5.0~5.5	2.18
6000	5	2.52	5.5~6.0	2.38
8000	5	2.52	6.0~6.5	2.38

注：正三角形布点时取大值，正方形布点时取小值。

4.2.5 1 强夯密实法工艺设计增加了复夯的概念，主要考虑了当夯点的夯坑深度过深，仅靠满夯解决不了夯坑以上土层的加固密实。

2 不同能级组合时，宜采用正方形布点。

第一遍高能级夯点，夯点间距可采用 2.5 倍~3 倍锤径。

第二遍中等能级夯点，正方形中间点。

第三遍低能级夯点，夯点间距取第一遍夯点间距的一半。

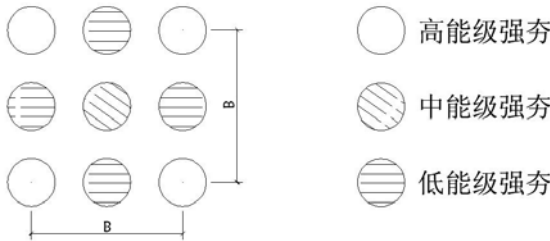


图 1 不同能级组合夯点间距和布点形式

3 不同能级组合时，可参考以下组合形式：

1) 6000 kN.m、4000 kN.m、2000 kN.m，满夯能级 1500 kN.m；

2) 8000 kN.m、5000 kN.m、3000 kN.m, 满夯能级 2000 kN.m。

4.2.6 强夯时, 点夯的单点夯击满足本条的三款要求时, 击数一般在 (8~15) 击之间, 当地基为低饱和度、透水性好的地基土时, 如果承载力特征值设计要求大于 250kPa, 压缩模量设计要求大于 12MPa, 尽管最后两击夯沉量平均值已满足设计要求的数值, 仍应增加夯击数至 (15~20) 击以上。多项工程检测证明, 在单点夯击数 (15~20) 击之间, 正是地基强度、压缩模量大幅增长的阶段。6000kN·m~8000kN·m 能级强夯的点夯夯击数在达到 20 击后, 地基土 6m~8m 深度内的压缩模量 E_s 的平均值可达到 18 MPa ~20MPa。

4.2.9 当地基土扰动层厚度在 1m~3m 时, 满夯能级可取 1000kN.m ~2000kN.m; 满夯能级也可根据点夯的能级确定, 当主夯能级大于等于 6000kN.m 时可取 2000kN.m; 当主夯能级在 4000kN.m~6000kN.m 时, 可取 1500kN.m; 当主夯能级小于等于 3000kN.m 时, 可取 1000kN.m。

满夯的击数直接决定了地基持力层的强度与承载力, 击数过少, 持力层的强度和承载力很难提高。

满夯夯印搭接 1/4 锤径有两方面的意义, 一是现场直观观察就可以监控满夯的施工质量, 保证满夯的加固效果。同时, 夯印搭接范围不宜过大, 搭接范围增大会导致夯锤落地不稳, 产生夯锤落点偏移, 加固效果反而降低。

4.3 强夯置换法

4.3.1 采用强夯置换法处理后的地基承载力特征值可达 180 kPa 左右, 压缩模量 E_s 多在 8MPa 左右, 最大可达 10MPa。

4.3.4 本条对强夯置换法的夯锤设计参数作了规定。强夯置换由于需将硬质粗颗粒材料夯入软土层中较大深度, 故需较大锤底压力, 因此夯锤的底面积不宜大。

4.4 强夯半置换法

4.4.1 采用强夯半置换法处理后的地基承载力特征值可达 200kPa 左右, 压缩模量多在 10 MPa, 最大可达 12MPa。

4.5 特殊性岩土地基强夯

4.5.11 湿陷性黄土地基的强夯有效加固深度在缺少经验或试验资料时，可按《湿陷性黄土地区建筑规范》（GB50025）表 6.3.6 确定。

《湿陷性黄土地区建筑规范》（GB50025）表 6.3.6

土的名称 单击夯击能 (kN.m)	全新世 (Q ₄) 黄土、 晚更新世 (Q ₃) 黄土	中更新世 (Q ₂) 黄土
1000~2000	3~5	—
2000~3000	5~6	—
3000~4000	6~7	—
4000~5000	7~8	—
5000~6000	8~9	7~8
7000~8000	9~12	8~10

注：1 在同一栏内，单击夯击能小的取小值，单击夯击能大的取大值；

2 消除湿陷性黄土层的有效深度，从起夯面算起。

本条湿陷性黄土地基强夯加固深度修正系数 α 的取值方法，根据山西地区多项湿陷性黄土地基强夯施工经验总结确定，其含义实质是：

湿陷性黄土的强夯加固深度取决于土的状态，即处于坚硬、硬塑还是可塑-软塑状态，不同的状态所消耗的能量也不同，加固效果也不同，而土的状态不仅与含水量有关，也和土的类别有关。当土的类别为粉质粘土时，其结构强度要大于粉土，强夯所消耗的能量也大。近年在灰土挤密桩的施工经验中也出现过类似的情况，采用同样的施工参数，粉土湿陷性黄土的湿陷性消除情况要好于粉质粘土湿陷性黄土，故表 4.5.11 用 I_p 和 I_L 两个参数分四种情况确定 α 值。

4.5.14 超厚湿陷性地基指厚度超过 14m，用 8000kN.m 能级强夯已难以消除湿陷性黄土地基的全部湿陷性。超厚湿陷性黄土地基一般位于黄土塬区，地势高、含水量低、土质坚硬，直接强夯地基处理效果差。

山西吕梁横泉水库旧坝体坝基，湿陷土层厚度达 17m。在利用自然降雨增湿后，用 8000kN.m 能级，采用大夯距，隔行隔点跳打，多遍夯的施工方法。第一、二批的夯坑深度达到 5.0m 以上，第三、四批的夯坑深度达到 4.5m 以上，消除湿陷深度

达到 17m（从起夯面计）。

山西太原双明房地产开发公司五龙湾开发区地基处理项目，场地为Ⅲ级自重湿陷性黄土地基，湿陷土层厚度达到 18m。在采用洛阳铲成孔、注水增湿措施以后，8000kN.m 能级强夯的夯坑深度均达 5.0m 以上，而在增湿前的夯坑深度不到 2m。

4.5.16 式 4.5.16 中的系数 w_s 为每 kg 生石灰的降水率，此系数的取值来源于《地基处理手册》深层搅拌法、石灰粉体深层搅拌法一节。

在软弱的地基中加入生石灰，它便和土中的水分发生反应形成熟石灰，在这一反应中，有相当于生石灰重量 32% 的水分被吸收。形成熟石灰时，形成的水化热又促进了水分蒸发，从而使相当于生石灰重量 47% 的水分蒸发掉，也就是说，形成熟石灰时，相当于生石灰重量 79% 的水被减少。本规程在取值时考虑了一定的折减。

4.5.17 山区地基存在以下不良地质现象：

- 1 建设场区内，在自然条件下可能存在滑坡、断层破碎带；
- 2 在施工过程中，因挖方、填土、堆载和卸载等对山坡的稳定性造成影响。
- 3 建筑场地地基的不均匀性。
- 4 岩溶和土洞的发育；
- 5 出现崩塌、泥石流、滑坡等不良地质现象的可能。
- 6 地面水、地下水对建筑地基和建筑场区的影响。

强夯在山区地基原地基加固时，可以对断层破碎带夯实加固，对原地基中存在的软弱土层、软弱结构面采用强夯密实或强夯置换的方法予以加固。

对岩溶发育地基，当石芽、土洞、溶洞、漏斗等构造同时存在时，地基的强度极不均匀，处理起来较为棘手，强夯法可以通过覆盖后强夯、高能量先破碎再加固、回填后再强夯等手段灵活处理。

强夯地基处理山区地基、分层回填地基有以下优势：

1 强夯夯击功能大，且能级选择的自由度大。强夯的能级目前国内多采用 1000kN.m～8000kN.m，可根据地基条件和回填分层厚度不同，通过经济技术比较，选择不同的能级进行处理。

强夯的夯击能，远大于分层碾压的能量，夯点的压实度在地基土级配良好，条件适合的情况下，其压实度常常大于 1.0，夯点墩体处于超压密、超强状态，对滑动面有分割作用。

2 强夯的影响深度大，上层土的夯点压实墩，可以嵌入下层土层，形成相互交错之势，对于层面之间具有锁紧作用，消除了层面之间的软弱结构。

3 强夯可以对填筑体下的原地基进行加固，增强了填筑体基础的强度，使原地基可能产生的滑动的软弱结构面消失，消除了高填土地基深层滑动的可能性。

4.6 人工回填建造地基强夯

4.6.1 根据近几年的强夯经验，在南方湿润多雨地区当填土材料中土与石的比例小于等于 7:3 时，填土地基的加固效果较好。在强夯置换施工中，垫层材料和置换材料土石比小于等于 3:7 时，既可满足置换墩的强度要求，也可满足透水性要求。因此土石比控制是填土地基和高饱和度地基强夯质量的一个有用指标。

根据《岩土工程勘察》(GB50021) 6.4 节混合土条文说明 6.4.1 条：“经验和专门研究表明，粘性土、粉土中的碎石组分的质量，只有超过总质量的 25% 时，才能起到改善土的工程性质的作用；而在碎石土中，粘粒组分的质量大于总质量的 25% 时，则对碎石土的工程性质有明显的影响，特别是当含水量较大时。”；在 3.3.2 条碎石土分类中，作为碎石土分类下限的角砾、圆砾的定义为：“粒径大于 2mm 的颗粒质量超过总质量的 50%”。由此将土与石的分类界限定为粒径 2mm。在实际应用中，为了便于操作，可采用体积比。

关于块石填土地基的强夯，国内目前并没有适用的相关规范，目前所依据的是建设部 2004 年第 218 号公告，关于发布《建设部推广应用和限制禁止使用技术》的公告中，将“强夯法处理大块石填土地基”列为推广应用新技术。其主要技术性能特点为：“适用于填料粒径大（最大可达 800 mm）的高填土地基分层强夯地基处理。与碾压法相比，可减少填料破碎和分层铺填费用。分层出来的厚度可达 4m，可降低造价和缩短工期。其适用范围为大面积、大块石高填土地基，如开山填谷，开山填海，西部机场和道路工程。”

泥岩作为填土材料，在我国工程界历来有较大争议。但在我国西南地区，泥岩分布很广，在这些地方建造高填土地基，泥岩成为填土地基材料主要来源。如果不就地取材，从外地购入填土材料，将会加大地基处理成本。同时在土石方平衡、环境保护方面，也造成很大的困难。近年来，在贵州发耳电厂、湖北宜都电厂、四川宜宾福溪电厂，采用泥岩作为填土材料，取得了很好的效果。本规程这次对泥岩等

易软化、泥化岩石作为填土材料的使用条件做了一些规定。

《泥岩作为高填土地基材料加固效果的研究与应用》2008 年获得山西省科技进步三等奖。

4.6.3 块石填土地基的填筑方法应符合以下要求：

1 无论哪一类块石高填土地基，在填筑时，必须采用分层堆填，绝对禁止抛填。分层堆填的厚度可根据运输车辆的吨位，取 0.8m~1.2m。

2 通过爆破—开挖—装车—堆卸—推土机推平—机械破碎锤二次破碎大颗粒几道工序，使填料得到最充分的拌合，达到最好的级配。这样强夯地基处理，才能够达到最好的加固效果和最经济的成本。

4.6.6 由于强夯加固深度并不随着能级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。对于高填土地基，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处理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多为 3000kN.m、4000kN.m 和 6000kN.m。

1 填土地基强夯的分层厚度

填土地基强夯的分层厚度可根据拟采用的强夯能级、填料成份和级配要求确定，国内经验一般采用的分层厚度见表 4.6.6，表中数据仅是针对一般情况而言，当填土材料岩性不同，设计要求不同时，还要具体情况具体对待。

(1) 当填土材料为泥岩、板岩和页岩等软岩成份时，这类岩石泥化后的沉降量大，而级配的控制又不可能完全避免土层中的空隙在强夯后消失，故强夯时，需要较大的能量，将块石击碎，强夯的分层厚度应适当降低，并宜通过试夯确定分层厚度。

(2) 对砂岩等易风化的中等硬度的岩石，风化后的沉降量较大，同时还可能产生渗透破坏与变形，而级配的控制也不可能完全避免土层中的空隙在强夯后消失，故强夯时需要更大的能量，强夯分层厚度应进一步降低，分层厚度应通过试验确定，试验时应开挖探槽，直接观察了解孔隙的消除情况。

(3) 对于石灰岩等较硬岩石，强夯不可能将岩块击碎，只能靠级配严格，夯实挤密，同时这类地基也不易产生泥化、风化，故分层厚度可参考表 4.6.6 的数据。

5 施工

5.1 一般规定

5.1.2 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，涉及到安全标准的确定、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数据，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。

根据目前所积累的施工经验和所掌握的一些资料，这里提供一些意见，供广大设计和施工人员参考。

1 强夯振动有以下一些普遍规律：

- 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) 强夯振动的震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土层软弱厚度薄、下卧土层坚硬时，振动强度衰减较慢。
- 3) 强夯振源点位于相对标高低处时，在相对标高较高处的振动效应是放大；强夯振源点位于相对标高较高处时，在相对标高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。

了解了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。

2 目前，国内还没有专门的强夯振动安全标准，工程界一般采用国家标准《爆破安全规程》GB6722 的相关规定，见表 4。

表 4 爆破振动安全允许标准

序号	保护对象类别	安全允许振速 (cm/s)		
		<10Hz	10Hz~50Hz	50Hz~100Hz

1	土窑洞、土坯房、毛石房屋 ^a	0.5~1.0	0.7~1.2	1.1~1.5
2	一般砖房、非抗震的大型砌块建筑物 ^a	2.0~2.5	2.3~2.8	2.7~3.0
3	钢筋混凝土结构房屋 ^a	3.0~4.0	3.5~4.5	4.2~5.0
4	一般古建筑与古迹 ^b	0.1~0.3	0.2~0.4	0.3~0.5
5	水工隧道 ^c	7~15		
6	交通隧道 ^c	10~20		
7	矿山巷道 ^c	15~30		
8	水电站及发电厂中心控制室设备	0.5		
9	新浇大体积混凝土 ^d	2.0~3.0		
	龄期：初凝~3d	3.0~7.0		
	龄期：3 d~7d	7.0~12		
	龄期：7d~28d			
注 1：表列频率为主振频率，系指最大振幅所对应波的频率。				
注 2：频率范围可根据类似工程或现场实测波形选取。选取频率时亦可参考下列数据：硐室破 <20Hz；深孔爆破 10Hz~60Hz；浅孔爆破 40Hz~100Hz。				
a 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。				
b 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。				
c 选取隧道、巷道安全允许振速时，应综合考虑构筑物的的重要性、围岩状况、断面大小、爆源方向、地震振动频率等因素。				
d 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。				

除了《爆破安全规程》，因强夯振动波的传播方式及衰减规律同动力机器基础的振动规律十分相似，所以强夯安全标准还可参考动力机器基础车间和房屋的允许极限振幅标准，车间和房屋允许极限振幅参考值见表 5。

表 5 车间和房屋的允许极限振幅参考值(mm)

精密测量仪实验室	0.0
精密车床和试验设备车间	0.02-0.04
自动电力操纵的汽轮发电机	0.02
铸工部和特殊制型部	0.03-0.05
行政用房和居住用房	0.05-0.07

为今后深入研究强夯振动影响积累资料，本规程建议采用国家标准《动力机器基础设计规范》（GB50040）提供的振动基础振波随距离的衰减公式，计算振动防

护体的位移振幅，并以表 5 的防护标准确定安全距离。

$$A_{rj} = A_0 \left[\frac{r_0}{r} \xi_0 + \sqrt{\frac{r_0}{r}} (1 - \xi_0) \right] e^{-f_0 \alpha_0 (r - r_0)} \quad (1)$$

式中 A_{rj} —距离夯击点中心 r_j 处地面上的振动线位移，m；

A_0 —夯击点处的振动线位移，m；

f_0 —夯击点处的振动主频，一般为 50Hz 以下；

r_0 —夯锤半径， $r_0 = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$ ；

ξ_0 —量纲系数，按表 6 选用；

α_0 —地基土能量吸收系数，按表 7 选用。

表 6 系数 ξ_0 值

土的名称	振动基础的半径或当量半径 r_0 /m							
	0.5 及以下	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7 及以上
一般粘性土、粉土、砂土	0.70-0.95	0.55	0.45	0.4	0.35	0.25-0.30	0.23-0.30	0.15-0.20
饱和软土	0.70-0.95	0.50-0.55	0.40	0.35-0.40	0.23-0.30	0.22-0.30	0.20-0.25	0.10-0.20
岩石	0.80-0.95	0.70-0.80	0.65-0.70	0.60-0.65	0.55-0.60	0.50-0.55	0.45-0.50	0.25-0.35

注： r_0 为中间值时， ξ_0 可用插入法。

表 7 地基土能量吸收系数 α_0 值

地基土名称状态		$\alpha_0 / (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$
岩石（覆盖 1.5-2.0m）	页岩、石灰岩	$(0.385-0.485) \times 10^{-3}$
	砂岩	$(0.580-0.775) \times 10^{-3}$
硬塑的粘土		$(0.385-0.525) \times 10^{-3}$
中密的块石、卵石		$(0.850-1.100) \times 10^{-3}$
可塑的粘土和中密的粗砂		$(0.965-1.200) \times 10^{-3}$
软塑的粘土和稍密的中砂、粗砂		$(1.25-1.450) \times 10^{-3}$
淤泥质粘土、粉土和饱和细砂		$(1.200-1.300) \times 10^{-3}$
新近沉积的粘土和非饱和松散砂		$(1.800-2.050) \times 10^{-3}$

3 国内部分工程强夯振动实测安全施工距离见表 8、表 9 和表 10。

表 8 山西化肥厂黄土场地振动速度与夯点距离的关系

距 离 (m) 强 夯 能 级	振 动 速 度 振 动 速 度 (cm/s)				
	0.5	1	2	3	5
6250kN.m	50	33	22	18	15
5000kN.m	45	30	20	17	14
4000kN.m	39	27	18	16	13
3000kN.m	33	23	16	15	12
2000kN.m	27	19	14	12	10
1000kN.m	20	15	12	10	8

表 9 贵州黔东电厂石灰岩碎石土回填场地安全施工距离

控制项目 安全 安全 施工距离 标准 能 级	频率 (Hz)	振动速度	极限振幅
	<10	0.5cm/s	0.05~0.07 (mm)
4000kN.m	55m		55m
6000 kN.m	55m		55m
8000 kN.m	100m		150m

表 10 太原卫星发射中心体育馆强夯振动速度与夯点距离

安 全 标 准 能 级	振 动 速 度 (cm/s)				
	0.5	1	2	3	4
7000kN.m	150	100		70	50

表 7~表 9 是地基土性质不同的三个工程实例。山西化肥厂强夯振动测试场地，湿陷性黄土层厚度在 18m 左右，液性指数在 0.165~0.350 之间，处于硬塑-可塑状态，是深厚土层强夯振动的典型代表，其强夯振动强度随着距离的增加衰减较快；贵州黔东电厂是强度较高的石灰岩碎石土回填场地强夯振动的典型代表，振动传播远，衰减较慢；太原卫星发射中心地基土上部为湿陷性黄土，厚度在 11m 左右，下部为砂卵石层，属于上软下硬土层，地基强夯时的振动强度更大，衰减更慢。

5.1.3 强夯施工侧向挤压水平位移的安全施工距离多远小于强夯振动安全施工距离。其一般规律是：强夯密实法侧向水平位移小于强夯置换法。根据大连填海地基强夯试验和武钢四烧强夯置换试验检测结果，3000kN.m 能级强夯密实法侧向水平位移在 10m 处为 1cm；3000kN.m 能级的强夯置换法在 16m 处的水平位移为 1.4cm。

5.3 施工机具

5.3.1 强夯施工技术发展到现在，仍然没有定型的专业化施工设备，现在大量使用的设备有两种：一是履带式起重机起重臂直接悬挂夯锤；二是履带式起重机加装门架支撑装置的强夯设备。

强夯施工时，由于夯锤脱离脱钩器时会产生较大的冲击力，所以强夯适用的起重机类型宜为机械传动式，液压传动式起重机抗冲击性较差，不适合用作强夯设备，但目前国内机械传动的起重机最大起重量为 50t 左右，因此国内强夯设备，特别是较高能级的强夯设备大多需要加装门架支撑来提升起重机的起重能力，同时，加装支承结构强夯设备还具有以下的特点：

- 1 带有支承结构的强夯设备，强夯时夯击的落点好，重迭性好。
- 2 带有支承结构的强夯设备，适合我国国内现有起重机械装备水平，用较小起重量的机械便可起吊较重的夯锤，经济性好，节约能源。
- 3 带有支承结构的强夯设备，以门架和起重机组成三点承重结构，稳定性好，安全性、可靠度高。

加装门架支撑装置的强夯设备选型可参考表 11。

表 11 加装门架支撑装置强夯设备选型参考值

能级 (kN.m)	锤重 (kN)	落距 (m)	门架高度 (m)	门架断面 (mm)	起重机起重 量 (kN)	起重臂长度 (m)
1000	100-150	6.67-10	18.8	600×600	150	20
2000	150-200	10-13.3	18.8	600×600	150-200	20
3000	150-200	15-20	23.8	700×700	200	25
4000	200	20	23.8	700×700	250	25
5000	250	20	23.8	700×700	320	25
6000	250-300	20-24	23.8-26.8	800×800	360	25-28
7000	300-350	20-23.3	23.8-26.8	800×800	400	25-28
8000	350-400	20-22.8	23.8-26.8	800×800	500	25-28
10000	500	20	24	1000×1000	500	25

5.5 施工质量控制

5.5.5 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 质量检测

6.2 竣工验收检测

6.2.1 地基强度指标贯入试验、重型动力触探试验、十字板剪切试验、旁压试验等原位检测取得的力学强度指标，以及土工试验取得的 c 、 ϕ 值，通过这些试验指标也可以间接确定和计算地基承载力；地基静载荷试验可以直接测定地基承载力，所以地基强度和地基承载力还是有一定的区别。

6.2.8 由于块石填土地基的特殊性，其强夯加固效果的检测与评价也必须采取与其特点相适应的检测与方法。

块石填土地基加固效果的检测，除了地基强度、密实度、变形模量等力学指标的检测之外，还应用开挖探槽，用肉眼直接观察地基剖面架空大孔隙消失的情况，作为强夯有效加固处理深度评价的最直接标准。我国压实填土的质量以压实系数 λ_c 控制，压实系数 λ_c 为压实填土的控制干密度 ρ_d 与最大干密度 $\rho_{d\max}$ 比值。压实填土的最大干密度和最优含水量由击实试验确定。当填料为碎石或卵石时，其最大干密度在 $2.1\text{ t/m}^3\sim 2.2\text{ t/m}^3$ 之间。对于块石填土地基，其最大粒径已超过现有规范的规定，在实际应用时其岩石成份的很复杂，其最大干密度的确定非常困难，再用压实系数作为质量控制指标，就显得很不合理，误差较大，故本规程建议对块石填土地基夯实质量控制指标，可以采用我国水利、公路、民航系统的控制标准。我国水利系统《碾压式土石坝设计规范》（SL274）4.2.6 条规定：堆石的坝的填筑标准，采用孔隙率的设计控制标准并应符合下列要求：

- 1 土质防渗体分区坝和沥青混凝土心墙坝的堆石料，孔隙率宜为 20%-28%。
- 2 沥青混凝土面板堆石料的孔隙率宜在混凝土面坝堆石坝和土质防渗体分坝的孔隙率之间选择。
- 3 采用软岩风化岩筑坝时，孔隙率宜根据坝体变形、应力及抗震强度等要求确定。

而固体体积率=1-孔隙率，所以孔隙率的设计控制标准实质上就是固体体积率。

我国民航系统《民用机场飞行区土（石）方与基础施工技术规范》

(MH5014-2002) 4.5.11 条规定：“石方填筑和土石混合料的密实度应用固体体积率控制，可用灌砂法或水袋法检测。土基区应不小于 83%，土面区应不小于 72%。其标准密实度应根据每种填料的不同含石量的最大干密度做出标准干密度曲线，然后根据试坑挖取试样的含石量。从标准干密度曲线上查出对应的标准干密度”，表 2、表 3 是昆明新机场填筑体密实度标准和承载力特征值要求。

表 2 填筑体密实度标准

序号	分区	填料性质	密实度	干密度 (g/cm ³)	固体体积率 (%)
(1)	飞行道槽区	土方填筑体	0.95		
		石方填筑体			79
(2)	边坡稳定影响区	土方填筑体	0.93		
		石方填筑体			78
(3)	飞行土面区	土方填筑体	0.88		

注：干密度采用重型击实标准。

相应地基承载力要求见表 3：

表 3 填筑体承载力特征值要求

序号	分区	填料性质	地基承载力特征值 (kPa)
(1)	飞行道槽区	碎屑岩类石料	250
		碳酸盐类石料	300
(2)	边坡稳定影响区	碎屑岩风化土料	180
		碎屑岩类石料	220
		碳酸盐类石料	250
(3)	飞行土面区	红粘土、粘性土	150
		碎屑岩风化土	180

我国《公路路面基层施工技术规范》(JTJ034) 采用固体体积率作为填隙碎石路基碾压后的质量评价指标。同时有关报道表明：常规填筑路基的固体体积率约为 72%，而强夯红色泥岩填筑路基的固体体积率约为 87%，有效避免了红泥岩遇水崩解软化后，由于颗粒间隙过大而使路基发生沉陷的隐患。

6.3 检测布点

6.3.8 强夯后检测面应选在基础底面设计标高以上，夯后整平面以下一定深度比较妥当。强夯后的地基表面，总存在一定厚度的扰动层，尽管扰动层可以通过碾压处

理，但其强度和强夯加固层存在一定的差别。如果检测面选择在地表，检测结果不一定真实反映强夯加固带的加固效果；检测面也不宜过深，最深不宜超过基础设计底标高。因此，本条规定检测面标高宜选在整平面以下 0.5-0.8m，可根据强夯满夯能级大小、扰动层厚度、基底设计标高等因素确定。

附加说明一：在本规程编制过程中，以下单位、专家和学者提出了宝贵的建议与意见，谨致诚挚的感谢。

太原煤炭设计研究院 勘察大师	王步云
黑龙江城市规划勘察设计院 教授级高工	何新东
山西省建筑科学研究院 教授级高工	崔朝显
北京交通大学 教授	白 冰
北京国电华北电力工程有限公司勘测部 高级工程师	张新奎
大连港口建设咨询监理有限公司 高级工程师	赵 雷
赛鼎工程有限公司 高级工程师	李 强
赛鼎工程有限公司 高级工程师	高晓娟
广西电力工业勘察设计院 高级工程师	梁远忠
机械工业第六设计研究院 教授级高工	白 玲
山西六建集团有限公司 教授级高工	梁福中
机械工业勘察设计院 高级工程师	夏玉方
天津大学土木系 教授	顾晓鲁
山西省建筑工程（集团）总公司 教授级高工	哈成德
中国建筑科学研究院 研究员	甘厚义
西南电力设计院勘测工程分公司 高级工程师	李世柏
西南电力设计院发电工程分公司 教授级高工	鄢明章
西南电力设计院勘测工程分公司 教授级高工	潘 峰
西南电力设计院发电工程分公司 高级工程师	黄佑验
江西省建筑设计研究总院 高级工程师	刘建生
江西省机械施工公司 高级工程师	樊小罗
江西省水电工程局 高级工程师	何炳弢
南昌大学建筑工程学院 教授	赵抚民
陕西省建筑科学研究院 教授级高级工程师	朱武卫
山东省建筑科学研究院 高级工程师	卜发东
太原理工大学 教授	裘以惠
太原理工大学 教授	史美筠

太原理工大学 教授	白晓红
山西省运城市建设局 教授级高工	孙文忠
辽宁抚顺石化公司 高级工程师	蔡桂林
大连港集团有限公司 高级工程师	刘 伟
大连万鹏基础工程有限公司 经理	刘向东
大连港口建设管理有限公司 教授级高工	曹香光
山西省建筑工程（集团）总公司 高级工程师	杨娟玲

附加说明二：本规程涉及的有关专利

1、实用新型专利：异形夯锤

专利权人：山西省机械施工公司

2、发明专利：强夯半置换施工工艺

专利权人：山西省机械施工公司 山西建筑工程（集团）总公司