



T/CECS XXXX-20XX

中国工程建设标准化协会标准

夯扩挤密桩复合技术规程

Technical specification for composite foundation of
ram-compacted pile

(送审稿)

中国计划出版社

夯扩挤密桩复合地基技术规范

Technical specification for composite foundation of ram-compacted

pile

(送审稿)

CECS XXX : 20XX

主编单位：北京波森特岩土工程有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：

2023年北京

前言

本标准根据中国工程建设标准化协会《关于印发 2016 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划的通知》（建标协字[2016]084 号）的要求，经广泛调查研究，结合我国实际情况，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分 6 章和 2 个附录，主要技术内容包括：总则、术语和符号、基本规定、设计、施工、质量检验与验收等。

本标准的某些内容涉及“加固地基的施工方法（专利号：ZL 021 17383.4）”、“复合地基的施工方法（专利号：ZL 03100715.5）”、“一种湿陷性黄土地基的处理方法（专利申请号 201410311825.5）”、“一种自动控制重锤夯击的施工设备（专利号：201510073007.0）”等相关专利。涉及专利的具体技术问题，使用者可直接与本标准主编单位北京波森特岩土工程有限公司协商处理，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会归口管理，由北京波森特岩土工程有限公司负责条文的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送解释单位（地址：北京市昌平区东小口镇太平家园 31#楼，邮政编码：102218；电子邮箱：yangqian2000@126.com），以便今后修订时参考。

本规程主编单位：北京波森特岩土工程有限公司

本规程参编单位：建研地基基础工程有限责任公司

北京维拓时代建筑设计有限公司

中国铁路设计集团有限公司

北京交通大学

中国铁道科学研究院集团有限公司

甘肃省建筑设计研究院

山西省建筑科学研究院

宁夏建筑设计研究院有限公司

北京中海地产有限公司

中铁十七局集团有限公司

本规程主要起草人员：

本规程主要审查人员：

目次

CECS XXX : 2023	1
前言	2
1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	2
3 基本规定	4
4 设计	5
4.1 一般规定	5
4.2 夯扩挤密散体桩复合地基的设计	5
4.3 刚性夯扩挤密桩复合地基的设计	6
5 施工	8
5.1 施工设备	8
5.2 施工材料	8
5.3 施工控制	9
6 检验与验收	11
6.1 施工前	11
6.2 施工后	11
附录 A: 夯扩挤密桩施工记录表格	14
本规程用词说明	15
引用标准名录	16
条文说明	17

Contents

1	General provisions.....	1
2	Terms and symbols.....	2
2.1	Terms.....	2
2.2	Symbols.....	2
3	Basic requirements.....	4
4	Design.....	5
4.1	General requirements.....	5
4.2	Design of composite foundation with RGC.....	5
4.3	Design of composite foundation with RRP.....	6
5	Construction	9
5.1	Construction equipment.....	9
5.2	Construction material.....	9
5.3	Constructioncontrolling.....	10
6	Quality inspection and acceptance.....	11
6.1	Inspection before construction.....	11
6.2	Inspection and acceptance after construction.....	11
	Appendix Aconstruction record form.....	13
	Explanation of wording in this specification.....	14
	List of quoted standards.....	15
	Addition:Explanation of provisions.....	16

1 总则

1.0.1 为了使夯扩挤密桩复合地基技术的应用做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于建设工程中夯扩挤密桩复合地基的设计、施工及验收。

1.0.3 夯扩挤密桩复合地基的设计与施工，应根据工程地质、环境条件、建（构）筑物结构类型和设计条件等因素，因地制宜。

1.0.4 夯扩挤密桩复合地基的设计、施工和验收除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 夯扩挤密桩 ram-compacted pile

利用柱锤冲击地基成孔或采取其他方式成孔，通过向孔内分批填料夯实，并用一击贯入度进行密实度控制，挤密桩身和桩侧土而形成的桩。

2.1.2 一击贯入度 one penetration depth

直径为 355mm、质量为 $3.5 \times 10^3 \text{kg}$ 的锤，提升 6m 自由下落，贯入地基土中的深度。

2.1.3 夯扩挤密散体桩 ram-compacted granular column (RGC)

以没有胶结强度的散体材料施工的夯扩挤密桩。

2.1.4 刚性夯扩挤密桩 ram-compacted rigid pile (RRP)

增强体桩身材料硬化后具有一定胶结强度的夯扩挤密桩。

2.1.5 夯扩挤密桩复合地基 composite foundation of ram-compacted pile

增强体为夯扩挤密桩的复合地基。

2.1.6 加固区 reinforced area

夯扩挤密桩施工加固影响的区域。

2.1.7 下卧区 substratum area

夯扩挤密桩加固区范围以下复合地基受力影响的区域。

2.1.8 固化土 solidified soil

将固化剂、土和一定量的水拌合形成的混合物。

2.2 符号

2.2.1 作用与作用效应

R_a ——增强体单桩承载力特征值；

2.2.2 抗力与材料性能

f_{ak} ——天然地基土承载力特征值；

f_{cu} ——桩体试块（边长 150mm）标准养护 28d 的立方体抗压强度平均值；

f_{spa} ——深度修正后的复合地基承载力特征值；

f_{spk} ——复合地基承载力特征值；

f_{sk} ——处理后基底地基土承载力特征值；

q_{sia} ——桩身范围内第 i 层土的侧阻力特征值；

q_{pa} ——桩端端阻力特征值；

γ_m ——基础底面以上土的加权平均重度；

2.2.3 几何参数

A_p ——桩身截面面积；

d ——基础埋深；

l_i ——桩身范围内第 i 层土厚度；

u_p ——桩身周长；

2.2.4 计算参数

m ——复合地基面积置换率；

n ——复合地基土桩应力比；

α ——施工后桩间地基土承载力的提高系数；

α_p ——桩端端阻力发挥系数；

β ——桩侧土承载力的发挥系数；

δ ——夯扩挤密桩施工后桩端端阻力的提高系数

λ ——增强体单桩承载力发挥系数；

3 基本规定

3.0.1 夯扩挤密桩复合地基技术适用于处理填土、黏土、粉土、砂土和黄土地基，处理其他地基土时应根据成桩和载荷试验确定该技术的可行性。

3.0.2 在缺乏经验的地区使用夯扩挤密桩复合地基时，应在有代表性的区域进行工艺试验和载荷试验，确定施工工艺及设计工参数。

3.0.3 夯扩挤密桩复合地基的桩身材料应根据设计要求地基承载力、地质条件及施工设备等因素综合确定。

4 设计

4.1 一般规定

4.1.1 夯扩挤密桩复合地基设计前应完成以下工作：

- 1 收集建设场地的岩土工程勘察报告；
- 2 收集上部结构相关的设计资料；
- 3 收集项目所在地区类似工程的工程经验；
- 4 查明施工场地邻近建筑、地下工程、周边道路及管线等环境情况；

4.1.2 夯扩挤密桩复合地基的设计应包括：桩长、桩径、桩间距、一击贯入度、褥垫层厚度等参数选择，桩身和褥垫层材料的确定，地基承载力、变形和稳定性验算等。

4.1.3 夯扩挤密桩复合地基的桩长应根据地质条件和上部结构荷载综合确定，其最小桩长不宜小于 4m，最大不宜超过 20m；桩长除应满足承载力、变形和稳定性要求外，尚应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011 和《湿陷性黄土地区建筑规范》GB50025 的有关规定。

4.1.4 夯扩挤密桩复合地基处理范围以下存在软弱下卧层时，应进行软弱下卧层承载力验算，可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定执行。

4.1.5 夯扩挤密桩复合地基处理后的地基变形验算可按现行行业标准《建筑地基处理技术标准》JGJ 79 的相关规定执行。

4.2 夯扩挤密散体桩复合地基的设计

4.2.1 夯扩挤密散体桩复合地基处理后的承载力不宜大于 200kPa。

4.2.2 桩身施工材料可选用碎石、砂石、碎砖三合土、矿渣、素土等。

4.2.3 夯扩挤密散体桩桩径宜为 500mm~800mm，桩侧土孔隙比大、复合地基承载力要求高时取大值，反之取小值。

4.2.4 复合地基宜采用正三角形或正方形布桩，桩间距应根据桩侧土土性和复合地基承载力要求综合确定，宜为桩径的 3~5 倍，施工对邻桩影响小、承载力要求高时取小值，反之取大值。

4.2.5 初步设计时，复合地基承载力特征值可按下式计算：

$$f_{spk} = [1 + m(n - 1)]f_{sk} \quad (4.2.5-1)$$

$$f_{sk} = \alpha f_{ak} \quad (4.2.5-2)$$

式中： f_{spk} ——复合地基承载力特征值(kPa)；

f_{sk} ——处理后基底地基土承载力特征值(kPa)；

f_{ak} ——天然地基土承载力特征值(kPa)；

α ——施工后桩间地基土承载力的提高系数；可根据地区经验取值，当无经验时可取 1.1~1.3，桩侧土挤密效果好时取高值，挤密效果差时取低值；

m ——复合地基面积置换率；

n ——复合地基的桩土应力比，可根据地区经验确定，无地区经验时可按 3~7 取值，一击贯入度小于 10 时，可取 5~7；一击贯入度为 10~15 时，可取 4~6；一击贯入度为 15~20 时，可取 3~5。

4.2.6 夯扩挤密散体桩复合地基的处理范围应根据上部结构荷载分布、基础形式综合确定。对于一般地基处理，布桩应在基础外缘增加 1~3 排桩，且超出基底的宽度不应小于处理土层厚度的 0.5 倍；处理液化地基，在基础外缘处理的宽度不应小于基底下液化土厚度的 1/2，且不小于 5m；处理湿陷性地基，在基础外缘处理的宽度不应小于基底下湿陷土厚度的 1/2，且不小于 2m。

4.2.7 夯扩挤密散体桩复合地基应在桩顶设置褥垫层，且褥垫层应符合下列规定：

1 处理湿陷性黄土地基，褥垫层应采用 2:8 或 3:7 灰土，厚度宜为 300 mm~400mm，压实系数不应小于 0.95；

2 其他地基土处理，褥垫层宜采用中砂、粗砂、级配石，厚度宜为桩径的 (0.4~0.6) 倍，最大粒径不应大于 30mm，夯填度不应大于 0.9。

4.3 刚性夯扩挤密桩复合地基的设计

4.3.1 刚性夯扩挤密桩复合地基处理后的承载力宜为 200kPa~300kPa。

4.3.2 刚性夯扩挤密桩复合地基施工材料可选用水泥土、固化土、干硬性混凝土或其他胶凝性材料。

4.3.3 刚性夯扩挤密桩桩径宜为 450mm~600mm，桩侧土挤密效果好、承载力要求高时取大值，反之取低值。

4.3.4 刚性夯扩挤密桩复合地基桩间距应根据桩侧土的土性和挤密效果、复合地基承载力等因素综合确定，复合地基承载力要求高、挤密影响范围小时取小值，反之取大值。

4.3.5 初步设计时，刚性夯扩挤密桩复合地基承载力特征值可按式估算：

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m)f_{sk} \quad (4.3.5)$$

式中： λ ——增强体单桩承载力发挥系数，按地区经验确定；

A_p ——桩身截面积（ m^2 ）；

β ——桩侧土承载力的发挥系数，按地区经验确定，宜为 0.93~0.98，砂土、粉土和黄土取高值，填土、黏土取低值；

R_a ——增强体单桩承载力特征值（kN）。

4.3.6 增强体单桩承载力特征值应通过单桩竖向抗压静载荷试验确定，初步设计时也可按下式估算：

$$R_a = u_p \sum q_{sia} l_i + \alpha_p \delta q_{pa} A_p \quad (4.3.6)$$

式中： u_p ——桩身周长(m)；

q_{sia} ——桩身范围内第 i 层土的侧阻力特征值(kPa)，根据经验确定，没有经验时可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007 的有关规定执行；

l_i ——桩身范围内第 i 层土厚度(m)；

α_p ——桩端端阻力发挥系数，可按地区经验取值，无经验时可取 0.85~0.95；

δ ——夯扩挤密桩施工后桩端端阻力的提高系数，根据经验确定；

q_{pa} ——桩端端阻力特征值(kPa)，可根据经验确定，无经验时可按现行国家《建筑地基基础设计规范》GB50007 有关规定执行。

4.3.7 增强体桩身强度应满足下式要求：

$$f_{cu} \geq 4 \frac{\lambda R_a}{A_p} \quad (4.3.7-1)$$

$$f_{cu} \geq 4 \frac{\lambda R_a}{A_p} \left[1 + \frac{\gamma_m (d-0.5)}{f_{spa}} \right] \quad (4.3.7-2)$$

式中： f_{cu} ——桩身材料 28 天抗压强度平均值（kPa）；

d ——基础埋深（m）；

γ_m ——基础底面以上土的加权平均重度（ kN/m^3 ），地下水位以下取土的有效重度；

f_{spa} ——经深度修正后的复合地基承载力特征值（kPa）。

4.3.8 刚性夯扩挤密桩复合地基可只在基础范围内布桩，布桩可按现行行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 的有关规定执行。

4.3.9 刚性夯扩挤密桩复合地基褥垫层设计可按本标准第 4.2.7 执行。

5 施工

5.1 施工设备

5.1.1 夯扩挤密桩施工设备应根据工程地质条件、复合地基的设计参数、周边环境等因素综合确定，且宜优先选用信息化控制的施工设备。沉管可选用锤击跟管设备、振动沉管设备。当沉管困难时，可采用旋挖、长螺旋等其他设备辅助施工。

5.1.2 施工护筒宜采用无缝钢管，直径应与设计桩径匹配，宜为 400mm~600mm，且护筒壁厚不宜小于 2cm。

5.1.3 施工柱锤的重量宜为 30kN ~50kN，当成孔困难时，锤重可增加。锤径应与护筒内径相匹配，柱锤外侧离护筒内壁的距离不宜小于 2cm。

5.1.4 信息化控制的施工设备应定期进行检定，其中一击贯入度测量的允许误差不应大于 2cm，锤提升高度的允许误差不应大于 10cm。

5.2 施工材料

5.2.1 夯扩挤密桩施工材料应按设计要求进行配置，且应进行入场检验。

5.2.2 对具有时效性的材料，应合理安排施工时间，即拌即用，不得延迟使用。不得使用失效或性能不满足要求的材料。

5.2.3 夯扩挤密桩施工材料应符合如下要求：

1 散体材料宜选用碎石、卵石、角砾、圆砾、砾砂、粗砂、中砂、石屑、渣土或建筑垃圾等，最大颗粒粒径不得大于护筒内径的 1/2，不得含植物残体、生活垃圾等杂质，有机质含量不超过 5%。

2 灰土施工宜选用粉质粘土，不得含有松软杂质，土料应过筛，粒径不应大于 15mm。石灰宜用新鲜的消石灰或生石灰粉，其粒径不应大于 5mm。灰土体积比宜为 2：8 或 3：7。

3 固化土中固化剂的性能应符合现行协会标准《预拌流态固化土填筑工程技术标准》T/CECS1037 的要求，土料宜选用砂土、粉土或粉质粘土，且粒径不应大于 20mm。

4 干硬性混凝土的施工原材料性能应符合现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55 的有关要求。

5.3 施工控制

5.3.1 施工前应收集与工程相关的下列技术资料：

- 1 项目岩土工程勘察报告；
- 2 设计图纸；
- 3 施工机械及测量仪器的相关资料；
- 4 施工场地周边环境的有关资料。

5.3.2 施工前应编制施工方案，施工方案应包括：工程概况、地质情况、施工工艺、工程量、质量要求、工期和进度安排、施工机械设备、人员配置、施工材料、临建设施、现场平面布置、技术措施和安全措施等。

5.3.3 施工前应查明拟建（构）筑物场地地下障碍物（地下管线、电缆和旧基础等），评估施工影响，并制定相关保护措施。

5.3.4 施工前应对地下水进行专项调查，当地下水对施工不利时，应采取降水措施。

5.3.5 施工放线前应设置基准点，并定期复核高程和坐标，放线后应填写“工程定位测量放线记录”。

5.3.6 施工前应进行技术交底，内容应包括：

- 1 施工工艺流程；
- 2 施工材料要求；
- 3 施工图纸；
- 4 施工参数，包括施工深度、填料量及一击贯入度等；
- 5 施工技术措施和安全措施；
- 6 信息化施工的控制指标和操作流程。

5.3.7 施工前应进行成桩工艺试验。

5.3.8 挤密桩施工宜带护筒施工，当不塌孔时，散体材料夯扩挤密桩也可不带护筒施工。

5.3.9 夯扩挤密桩施工应分层连续进行，每段桩身施工应包括成孔、填料夯实和密实度控制。

5.3.10 挤密桩施工应符合下列规定

- 1 施工地面标高宜高于桩顶标高 50cm~100cm；
- 2 当桩身范围土层成孔困难时，可采用长螺旋钻孔工艺或其他成孔工艺辅助成孔；
- 3 施工中不得随意更改施工材料和施工控制参数，当无法满足设计要求时，应停止施工并通知设计；

4 施工顺序应以减少邻桩质量为原则。

5 施工中应严格按设计要求控制夯击落距，施工夯实时落距应按表 5.3.10 执行；

表 5.3.10 施工落距

序号	位置 (m)	柱锤提升高度 (m)
1	0.0~1.0	1.0
2	-1.0~-2.0	2.0
3	-2.0~-3.0	3.0
4	-3.0 以下	6.0

6 冬期或雨季施工时应采取防冻、防雨措施，结有冻块或被雨水淋湿、浸泡的材料严禁使用；

7 施工中应监测邻桩和周边地基土的隆起，邻桩和地基土隆起不得超过 15cm。

5.3.11 施工中应记录孔深、孔径、填料量和一击贯入度，施工记录表格可按附录 A 执行。

5.3.12 夯扩挤密桩施工完毕后，应对桩顶面进行满堂碾压或低能量夯实，并按设计要求铺设垫层。

6 检验与验收

6.1 施工前

6.1.1 夯扩挤密散体桩施工前应对原材料进行抽样检验，且应符合如下规定：

- 1 每 5000 方一个检验批，每个检验批不少于 3 个样品；
- 2 检验指标应符合本标准 5.2 节的要求；
- 3 检测方法可参照现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 执行；

6.1.2 刚性夯扩挤密桩施工前应对固化剂或水泥等胶凝材料进行抽样检验，且应符合如下规定：

- 1 每 500 吨一个检验批，每个检验批不少于 3 个样品；
- 2 固化剂检验可按国家城镇建设行业产品标准《软土固化剂》CJ/T 526 的有关规定执行，水泥检验可按国家建材行业标准《水泥强度快速检验方法》JC/T 738 的有关规定执行，石灰检验可按国家建材行业标准《建筑生石灰》JC/T 479 的有关规定执行。

6.2 施工后

6.2.1 夯扩挤密桩竣工后，应进行桩身施工质量、桩侧土的挤密效果及复合地基承载力等项目的检测。

6.2.2 夯扩挤密散体桩复合地基的质量检验标准应符合下列规定：

- 1 主控项目检验应包括：材料体积、原材料指标、桩径、桩长、复合地基承载力及一击贯入度；
- 2 一般项目检验应包括：材料有机质含量、桩位偏差、桩顶标高、垂直度及褥垫层夯填度（灰土压实系数）；
- 3 可采用重型动力触探或标准贯入试验对桩身及桩侧土的密实度进行抽样检验。抽样检验数量不应少于总桩数的 2%，且每个单位工程的桩身及桩侧土总检验点数均不应少于 6 个试点；
- 4 夯扩挤密散体桩复合地基的承载力应采用静载荷试验检测，可按行业标准《建筑地基检测技术规范》JGJ 340 的有关规定执行。每个单位工程单桩复合地基静载荷试验数量不少于总桩数的 1%，且不少于 3 个试点。

5 夯扩挤密散体桩复合地基检验方法及指标应符合表 6.2.2 的要求：

表 6.2.2 夯扩挤密散体桩复合地基质量检验标准

项	序	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	材料体积	/	>1.0	实际用量与计算体积比
	2	原材料指标	设计要求		抽样送检
	3	桩径	mm	0-+50	用钢尺测量
	4	桩长	m	≥设计要求	用钢尺测量
	5	复合地基承载力	kPa	设计要求	静载荷试验
	6	一击贯入度	cm	设计要求	按规定方法
一般项目	1	材料有机质含量	%	≤5	焙烧法
	2	桩位偏差	mm	≤50	全站仪或用钢尺测量
	3	桩顶标高	m	+50	水准仪
	4	垂直度	%	≤1.0	经纬仪检查套管垂直度
	5	褥垫层夯填度 (灰土压实系数)	(%)	0.9 (95)	水准测量

6.2.3 刚性夯扩挤密桩复合地基的质量检验标准应符合下列规定：

1 主控项目检验应包括：材料用量、原材料指标、桩径、桩长、一击贯入度、桩身强度、单桩承载力及复合地基承载力；

2 一般项目检验应包括：桩位、桩顶标高、垂直度、褥垫层的夯填度；

3 桩侧土施工质量可采用标准贯入试验或动力触探试验进行检测，检验数量不少于总桩数的0.5%，且每个单位工程桩身及桩侧土总检验点数不应少于3点；

4 增强体和复合地基的承载力检验应采用载荷试验，可按行业标准《建筑地基检测技术规范》JGJ 340的有关规定执行。单位工程的增强体和复合地基承载力检验总数不少于总桩数的1%，且单项不少于3根；

5 刚性夯扩挤密桩复合地基的检验方法和指标应符合表6.2.3的有关规定：

表 6.2.3 刚性夯扩挤密桩复合地基质量检验标准

项	序	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	材料体积	/	>1.0	实际用量与计算体积比
	2	原材料指标	设计要求		抽样送检
	3	桩径	mm	0-+50	用钢尺测量
	4	桩长	m	大于设计值	用钢尺测量
	5	一击贯入度	mm	小于设计值	按规定方法
	6	桩身强度	不小于设计要求		28d 强度
	7	增强体承载力	kN	设计要求	静载荷试验
	8	复合地基承载力	kPa	设计要求	静载荷试验
一般项目	1	桩位	条基边桩沿 轴线	≤1/4D	全站仪或用钢尺测量
			垂直轴线	≤1/6D	

目		其他情况	$\leq 2/5D$	
2	桩顶标高	m	+200	水准仪
3	垂直度	%	≤ 1	经纬仪检查套管垂直度
4	褥垫层夯填度	/	≤ 0.9	水准测量

本规程用词说明

1 为了便于在执行本规范条文时区别对待，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么做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准、规范执行时的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 《湿陷性黄土地区建筑规范》GB 50025
- 《土工试验方法标准》GB/T 50123
- 《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55
- 《建筑地基处理技术规范》JGJ 79
- 《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55
- 《建筑地基检测技术规范》JGJ 340
- 《软土固化剂》CJ / T526
- 《水泥强度快速快速检验方法》JC/T 738
- 《建筑生石灰》JC/T 479

中国工程建设标准化协会标准

夯扩挤密桩复合地基技术规程

Technical specification for composite foundation of ram-compacted pile

T/CECS XXXX-20XX

条文说明

目次

2 术语和符号	19
2.1 术语	19
3 基本规定	22
4 设计	23
4.1 一般规定	23
4.2 夯扩挤密散体桩复合地基的设计	23
4.3 刚性夯扩挤密桩复合地基的设计	27
5 夯扩挤密桩的施工	30
5.1 施工设备	30
5.2 工程材料	30
5.3 施工控制	30
6 质量检验与验收	32
6.2 施工后	32

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 夯扩挤密桩是一种通过特定的方式成孔后填料夯实，挤密填料的同时挤密桩侧土而成的桩。夯扩挤密桩一般采用锤击跟管设备、振动沉管设备或其他设备配合成孔，到设计标高后，分批次向孔内填料，提升柱锤，利用柱锤势能夯实填充料，同时挤密桩侧土，整个施工过程采用相同的控制指标（一击贯入度）进行控制，确保施工后桩身的密实度相同。该工艺能有效挤密桩侧土，提高复合地基承载力。夯扩挤密桩的挤密效果包括成孔过程的挤密和填料夯实过程的挤密。成孔一般利用柱锤提升产生的势能夯击地基土成孔，对地基土完成第一次挤密。成孔到设计标高后向孔内填料夯实，利用柱锤的势能对桩侧土和桩身二次挤密。由于夯扩挤密桩施工锤重较大，可达 3.5 吨~5 吨，比传统挤密桩的挤密效果好，处理后复合地基承载力提高更明显。

2.1.2 一击贯入度是夯扩挤密桩桩身挤密程度的控制指标。在每层施工填料夯实到一定程度后，提升 3.5 吨的柱锤 6 米后自由落体，测量贯入土中的深度即为一击贯入度。该指标越小，表明桩身材料密实度越高，强度越大，同时也表明桩身外侧桩侧土的围压越大，桩周土的挤密效果也更好，复合地基承载力也相应越高，反之三击贯入度越大，复合地基承载力相应较低。原则上施工中只要采用相同的一击贯入度进行控制，不均匀地基变得均匀。若采用非标准锤施工时，可根据单位面积冲击能量相等的原则进行标准一击贯入度的换算，确定施工控制参数。

在夯扩挤密桩施工过程中，破坏了原地基土的结构，重新挤密，改变了原地基土的土性和物理指标，因此可利用该工艺来处理液化土、湿陷性黄土或欠固结土，同时施工中由于采用相同的一击贯入度进行密实度控制，能有效调节地基的均匀性。

2.1.5 夯扩挤密桩复合地基是一种以夯扩挤密桩作为增强体的复合地基，其桩身材料可采用散体材料，也可采用胶凝材料，因此处理后地基承载力提高范围较大。夯扩挤密桩复合地基施工，一方面可显著提高复合地基承载力，同时施工中改变了地基土的土性，尤其对液化、湿陷或欠固结的地基中采用该技术，在提高承载力的同时还可以消除地基土液化、湿陷和欠固结，可实现一种施工工艺达到两种功效。

夯扩挤密桩为北京波森特岩土工程有限公司的专利技术，该技术自发明以来已经在民用、工业、市政等领域的多个项目中应用，尤其在很多国家重点项目中取得了良好的经济效益和社会、环境效益。表 1 为部分代表性的夯扩挤密桩项目。

表 1 部分代表性的夯扩挤密桩项目

序号	项目名称	桩身材料	桩长 (m)	桩径 (mm)	复合地基承载力 (kPa)
1	嘉浩别墅项目	碎石	6.5~7.0	550	150
2	北京中央美术学院迁建工程	碎石	8.0~9.5	550	150

序号	项目名称	桩身材料	桩长 (m)	桩径 (mm)	复合地基承 载力(kPa)
3	邢钢复二重机技术改造项目	碎石	6.0~9.0	500	180
4	怡景嘉苑小区一期丙-2楼工程	碎石	8.0~9.5	600	150
5	晋元庄雨水管道地基处理工程	渣土	8.0~9.0	550	120
6	北京市五环路阜石路立交桥工程	渣土	8.0~8.5	550	220
7	北京石景山区杨庄1路	渣土	8.0~9.0	550	180
8	北京市石景山晋元庄小区	渣土	7.5~8.5	550	150
9	北京祥龙华通物流园2#中转仓库	碎石	4.0~5.0	550	180
10	北京五环路四期五标段工程	碎石	8.0~10.0	550	180
11	首钢200万吨迁安钢铁厂制氧车间	碎石	6.0~8.0	600	150
12	圆明园花园别墅工程	碎石	6.0~8.0	600	120
13	北京天池湖生态农业观光园餐厅工程	碎石	2.0~4.0	550	180
14	北京吉普公司车间	碎石	8.0~9.6	550	150
15	朝阳区垃圾处理中心、渗沥液处理工程	水泥土	4.3~6.2	550	120
16	南水北调-滹沱河倒虹吸工程	碎石	5.0~9.0	650	180
17	北六环3标、5标、6标、7标、8标、10 标工程	渣土	7.0~10.0	500	150~220
18	旧宫绿化隔离带项目	灰土	5.0~6.6	400	180
19	南水北调S23\S35标段工程	碎石	4.0~8.0	600	150
20	京平高速公路7#、10#标段工程	碎石	5.0~8.0	600	180
21	茂华璟都苑(石景山TSM)工程	渣土	8.0~9.9	600	120
22	北京动车段工程	渣土	10.0~14.3	600	160
23	大连化工专用铁路线工程	渣土	5.0~9.5	600	150
24	北京市京华客车搬迁项目二期地基处理 工程	碎石	8.0~9.8	550	180
25	朝阳区来广营乡清河营娘娘庙修复工程地 基处理	水泥土	5.5~6.8	400	120
26	缅甸达贡山镍铁矿工程	碎石	4.0~8.0	600	130
27	青岛北站地基处理工程	碎石	8.0~10.0	600	160
28	南水北调(磁县段)复合地基工程	砂石	4.0~10.0	600	180
29	金隅嘉和园市政综合管线、道路及公建场 工程	渣土	4.0~14.0	600	120
30	金隅土桥工程	碎石	8.0~10.0	550	120
31	南水北调邯郸段工程	碎石	10.0~12.0	600	180
32	花石匠F3地基处理工程	渣土/干硬 性混凝土	3.5~10.0	600	140/280

序号	项目名称	桩身材料	桩长 (m)	桩径 (mm)	复合地基承载力(kPa)
33	天津新港北铁路集装箱中心站工程	水泥石	10.0~14.0	500	120
34	大兴区黄村镇狼垡消防供水分队工程	渣土	8.5~9.8	550	150
35	花石匠三期地基处理工程	渣土	4.0~9.5	600	160
36	金隅嘉业西砂东区定向安置房及配套项目	渣土	3.5~9.5	600	90
37	围场新奥车用燃气有限公司 LNG 加气站地基处理	渣土	8.0~10.0	600	180
38	巩义万洋置业商城一期工程	渣土	8.0~12.0	600	200
39	三门峡天鹅湾社区一期东区工程	渣土/干硬性混凝土	8.0~12.0	600	160~240
40	朝阳区东坝中学工程	砂石	4.0~6.0	600	120
41	兰州保利领秀山地地基处理工程	挤密	3.0~25.0	600	150
42	金隅澜湾（昌平东沙河西岸公建）工程	干硬性混凝土	5.0~7.0	550	240
43	京唐港东港铁路地基处理工程	碎石	8.0~10.0	600	150
44	金隅汇景苑小学幼儿园项目	碎石/干硬性混凝土	4.0~8.0	500/550	120/240
45	昌平南邵镇昌平科技园文化娱乐项目	渣土	4.0~7.0	600	145
46	太原南站工程	水泥石	8.0~10.3	600	150
47	深圳地铁十号线车辆厂地基处理工程	渣土	4.0~14.0	600	160

2.1.8 本标准涉及的固化土和常规用于肥槽回填的流态固化土不同，流态固化土含水量大，具有较大的流动性，坍落度可达 20cm 以上，而本标准涉及的固化土含水量相对较小，能被夯实挤密，否则含水量太大，施工中无法夯实挤密填料及桩周地基土，达不到挤密效果。夯实后的固化土中的固化剂在水化作用下发生固化反应，具有一定的强度，能显著提高桩身强度从而提高复合地基承载力。

3 基本规定

3.0.1 挤密桩的施工原理为提升一定高度，柱锤将柱锤势能转换为动能直接夯击地基土，挤密地基土，或排水固结，达到挤密效果。由于填土、黏土、粉土、砂土和黄土都有效挤密，因此挤密桩可适用处理该一类土。但不同的地基土，其孔隙比和含水量不同，挤密程度也不同，因此应根据不同地基土土性和设计参数选用合适的桩身施工材料。对于含水量高的黏性土，由于颗粒间孔隙大部分被水占据，挤密效果差，因此在该类土设计挤密桩时应先进行成桩试验，检验桩侧土的挤密效果。

3.0.2 由于地基土的土性差别较大，而夯扩挤密桩的施工和挤密效果受土颗粒大小、含水量等因素的影响较大，因此在缺乏工程经验的地区使用夯扩挤密桩复合地基，应在有代表性的场地上进行试验，确定工艺可行及设计参数。

4 设计

4.1 一般规定

4.1.2 传统复合地基的关键设计参数为桩径、桩长和桩间距，夯扩挤密桩设计参数除了桩径、桩长和桩间距外，还包括一击贯入度。桩身的强度也很大程度影响复合地基承载力，而一击贯入度是挤密程度的重要的控制指标。一击贯入度决定桩身的密实度和桩侧地基土的挤密效果，三击贯入度越小，桩侧土和桩身挤密效果越好。设计时一击贯入度的选取应结合地基条件和设计要求综合确定，当土的挤密效果稍差时，不宜单纯以增加一击贯入度来提高处理后的复合地基承载力，因为土的加固性差，可能达不到设计要求的一击贯入度，且过多的填料可能造成土的扰动破坏，反而起不到加固地基土的效果。

夯扩挤密桩的桩身材料可采用碎石、砂土、碎砖三合土、矿渣和素土等散体材料，也可选用水泥土、灰土、固化土、干硬性混凝土等胶结材料。不管采用哪种材料，施工原理都是挤密成孔，填料夯实挤密桩侧土。由于桩身材料不同，承载发挥机理不同，对复合地基承载力的影响也不同，当采用无胶结强度的散体材料施工时，由于桩身强度有限，承载力的提高主要来源于挤密桩侧土和散体桩身挤密后的材料强度，因此对复合地基承载力的提高有限。若采用具有胶结强度的材料施工，施工过程中既对桩周土和桩身材料挤密，同时由于桩身材料硬化后具有较高的强度，对复合地基承载力的提高更为明显。因此当承载力要求不高，或为满足稳定性要求的地基处理，桩身可以选用素土、填土、矿渣等散体材料。当处理后的复合地基承载力要求较高时，桩身可选用具有粘结强度的材料，包括水泥土、固化土或干硬性混凝土等。当处理湿陷性黄土时，考虑防水效果，建议采用灰土或固化土夯扩挤密桩，避免水通过桩身的空隙渗入地基土。当处理液化土层时，为增加地基土的挤密效果以及消散施工产生的超孔隙水压力，宜采用碎石作为施工填料，桩身可作为地基超孔隙水压力的消散通道。

4.1.3 夯扩挤密桩最大桩长理论上不受限制，但根据目前锤击跟管的施工设备，考虑施工功效，当带护筒施工时，夯扩挤密桩施工桩长不宜超过 20m，当桩身长度超过 20m，施工功效会降低，从施工成本上核算可能不经济。夯扩挤密桩施工最短桩长不宜小于 4m，这是因为，当桩长小于 4m 时，由于上覆压力小，填料的夯实度受影响，且施工中容易造成土体的隆起，桩侧土和桩身材料的挤密效果不好。当夯扩挤密桩复合地基处理地基土液化或湿陷时，复合地基桩长应根据处理深度确定，可大于 20m，但必须结合其他施工设备一起施工。

4.2 夯扩挤密散体桩复合地基的设计

4.2.1 夯扩挤密散体桩复合地基桩身为散体材料，桩身没有粘结强度。由于每种材料的夯实最大密实

度有限，桩侧土体对桩身的侧向约束有限，达到一定深度后，桩顶荷载无法有效传递到深层次桩身，当桩身受力到一定值，继续加载则桩身会出现侧向鼓出破坏，故夯扩挤密散体桩处理后的复合地基承载力不宜太高，根据经验一般不超过 200kPa。若桩侧土为较密实的土体，桩身施工采用渣土或建筑垃圾土时，地基承载力经过处理可超过 200kPa，故规范规定夯扩挤密散体桩复合地基处理后的复合地基承载力设计值不宜大于 200kPa，某些特定地基土或施工材料经过工艺和试验达设计要求时，承载力设计值可根据试验结果确定。

4.2.3 夯扩挤密桩的直径是指施工完毕后桩身的直径，不等同于成孔直径，因为在填料夯击过程中，桩侧向土的挤密造成夯击后的填料直径大于成孔直径，当桩侧土的挤密效果越好，夯击能量越大，两者间的直径差更大。

4.2.4 夯扩挤密桩桩间距的确定应根据复合地基的承载力、地基土持力层及桩侧土的土性、挤密效果等因素综合确定，一般可取桩径的 3~5 倍。桩侧土为含水量高的黏性土，由于土中空隙少，夯实挤密时，施工影响范围大，为避免邻桩的相互影响，设计间距应取大值；对可加固性好的砂土、粉土或含水量低的黏土可取小值。当复合地基承载力要求高时，为加大增强体的置换率，桩间距应取小值，反之取大值。桩间距越小复合地基置换率越大，理论复合地基承载力就越高，但设计时须考虑施工工艺的相互影响，若桩间距过小，可能影响临近的桩侧土的密实度或桩身施工质量，从而达不到预期的挤密效果，故桩间距的确定应根据设计要求和现场条件综合确定。

散体挤密桩既可以单独提高地基承载力，也可以用于改善地基土特性，当夯扩挤密桩复合地基单独用于湿陷、湿陷或欠固结的地基土处理时，由于地基土湿陷、欠固结与桩侧土的密实度相关，可根据处理后对应地基土的密实度、空隙比等指标确定桩间距。

4.2.5 复合地基承载力为增强体和桩侧土承载力的复合，增强体为散体材料时，桩侧土的挤密程度、桩身的挤密强度直接影响复合地基承载力，而桩身挤密强度与桩侧地基土的约束密切相关，若桩侧土的侧向约束越大，能在一定程度上延缓了增强体桩身侧鼓破坏，提高增强体单桩承载力，从而提高复合地基承载力。因此散体桩复合地基承载力决定因素包括挤密后桩侧土的承载力，与夯击能量和地基土的承载力相关，同时包括复合地基受力时桩与土应力比，本标准采用公式（4.2.5-1）和（4.2.5-2）估算夯扩挤密散体桩复合地基承载力。

夯扩挤密桩施工采用 3.5 吨的锤提升 6m 自由落体夯实填充料，夯击能量较大，对桩身材料的挤密较好，与小能量的挤密桩相比，桩身强度更高，桩与土应力比较大。由于桩身强度与夯击能量和桩侧地基土约束相关，土粒径越大，颗粒间咬合更好，则侧向约束大，桩身夯实强度也就越高。但每种材料的最大夯实强度有限，因此要准确确定桩身强度较困难，本标准采用桩与土应力比计算复合地基承载力。根据工程施工经验，复合地基受力时夯扩挤密散体桩桩土应力比为 3~7，一击贯入度小、地基土挤密效果好、桩侧土的约束好时，桩与土应力比取高值。反之当一击贯入度大、挤密效果稍差、桩侧土的约束差时，桩与土应力比取小值。由于经过夯实后桩侧地基土承载力有明显提高，根据经验，桩侧土承载力的提高系数可取 1.1~1.3。

以下为某夯扩挤密散体桩复合地基工程案例。

1 工程概况

拟建场地位于黑龙江省哈尔滨市。基础为柱下独立基础，由于天然地基承载力不满足设计要求，须进行地基处理，地基的设计要求：柱下区域复合地基承载力特征值 $f_{ak} \geq 200\text{kPa}$ ；地坪区域复合地基承载力特征值 $f_{ak} \geq 180\text{kPa}$ ，由于复合地基承载力的设计要求不高，故采用夯扩挤密散体桩复合地基。

2 地质资料

本工程钻探深度 30.0m 范围内的土层按其沉积年代及工程性质划分，表层人工填土层，其下为第四系松花江冲积成因黏性。包括：

粉质黏土素填土①层：黄褐色，松散~稍密，以粉质黏土为主，硬塑~硬可塑状态，含少量碎石等杂质，层厚 1.5m~6.7m。

杂填土①₁层：杂色，松散，主要为黏性土、碎石、碎砖等建筑垃圾和少量生活垃圾，层厚 0.5m~3.0m。

粉质黏土②层：褐黄色，可塑~软塑状态，中压缩性土，较均匀，稍有光泽，干强度中等，韧性中等，无摇振反应，含氧化铁，顶面埋深 3.5m~7.0m，层厚 6.0m~10.2m。

粉质黏土③层：褐黄色，硬塑~坚硬状态，中压缩性土，较均匀，稍有光泽，干强度中等，韧性中等，无摇振反应，含钙质结核，顶面埋深 11.8m~14.0m，层厚 1.5m~5.3m。

粉质黏土④层：褐黄色~黄褐色，硬可塑~软可塑状态，中压缩性土，较均匀，稍有光泽，干强度中等，韧性中等，无摇振反应，含氧化铁，夹粉土薄层，顶面埋深 14.2m~18.4m，层厚 2.1m~5.2m。

粉质黏土④₁层：褐黄色，软塑状态，中压缩性土，稍有光泽，干强度中等，韧性中等，无摇振反应，仅在 18[#]、19[#]、20[#]三个钻孔揭露，顶面埋深 16.5m~17.2m，层厚 1.2m~1.7m。

粉质黏土⑤层：褐黄色~黄褐色，软可塑状态，中压缩性土，较均匀，稍有光泽，干强度中等，韧性中等，无摇振反应，含氧化铁，顶面埋深 18.6m~23.3m，层厚 0.9m~3.6m。

粉质黏土⑤₁层：褐黄色，软塑状态，中压缩性土，稍有光泽，干强度中等，韧性中等，无摇振反应，顶面埋深 20.5m~21.7m，层厚 1.4m~2.1m。

粉质黏土⑥层：黄褐色，硬可塑状态，中压缩性土，较均匀，稍有光泽，干强度中等，韧性中等，无摇振反应，含氧化铁、钙质结核，顶面埋深 22.6m~25.4m，本次勘察未穿透此层，最大揭露厚度 7.4m。典型地质剖面见图 1。土的物理力学指标见表 1。

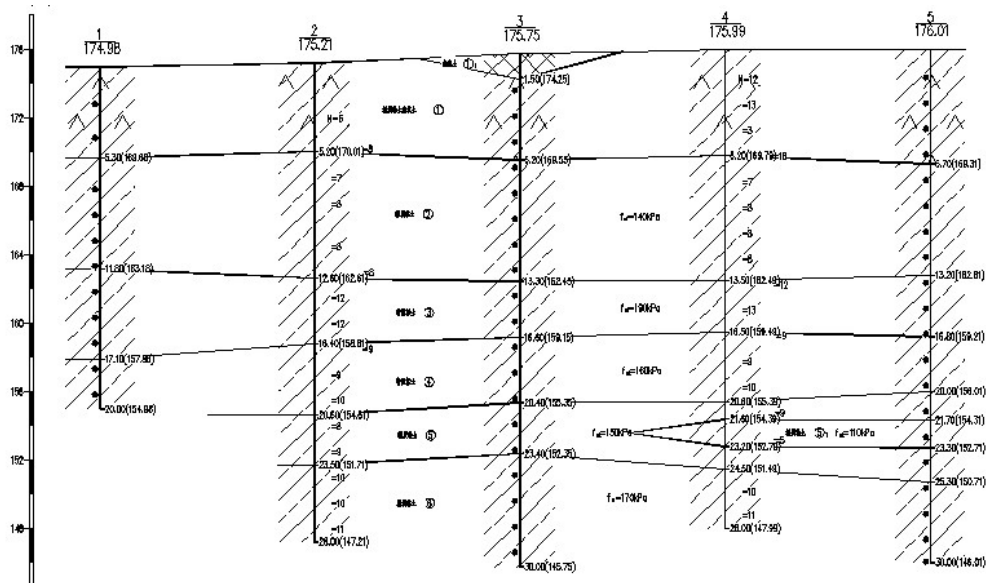


图 1 典型地质剖面

表 1 主要土层的物理力学指标

地层编号	土层	w (%)	e	γ (kN/m ³)	I_L	f_{ak} (kPa)
②	粉质粘土	22.2	0.719	19.3	0.42	140
③	粉质粘土	16.7	0.635	19.4	0.07	190
④	粉质粘土	22.1	0.728	19.2	0.43	160
④ ₁	粉质粘土	25.2	0.805	18.8	0.89	130
⑤	粉质粘土	23.9	0.714	19.7	0.61	150
⑤ ₁	粉质粘土	29.0	0.805	19.4	1.07	110
⑥	粉质粘土	22.0	0.664	19.9	0.36	170

3 复合地基设计

(1) 独立柱基下复合地基设计:

1) 参数确定

根据复合地基承载力设计要求, 夯扩挤密桩桩身材料采用渣土, 设计桩径 $d_0=550\text{mm}$, 桩间距 $s=1.6\text{m}$, 正三角形布置, 一击贯入度值小于 8cm , 由于处理后承载力要求较高, 桩身材料选用渣土。直接持力层地基土承载力为 110kPa , 夯扩挤密桩施工后桩侧地基土承载力提高系数取 1.2 , 处理后桩侧土的承载力特征值 $f_{sk}=132\text{kPa}$ 。由于桩身为渣土, 复合地基桩土应力比取 $n=6$ 。

2) 复合地基承载力验算

$$d_0=0.55\text{m}, s=1.60\text{m}.$$

面积置换率: $m=0.107$ 。

复合地基承载力: $f_{spk} = (1+m(n-1)) f_{sk}$

$$=(1+0.107 \times 5) \times 132$$

$$=202.6\text{kPa} > 200\text{kPa}, \text{满足设计要求。}$$

经计算基础沉降也满足设计要求。

(2) 地坪区域复合地基设计:

1) 参数确定

夯扩挤密桩桩径 $d_0=550\text{mm}$, 由于处理后承载力要求略低, 故桩距 $s=1.7\text{m}$, 正三角形布置, 一击贯入度值小于 15cm , 地基土承载力提高系数为 1.18 , 则处理后桩侧土的承载力特征值 $f_{sk}=129\text{kPa}$ 。根据一击贯入度和桩间距, 复合地基桩土应力比取 $n=5$ 。

2) 复合地基承载力验算

$d_0=0.55\text{m}$, $S=1.70\text{m}$ 。

面积置换率: $m=0.095$ 。

$$\begin{aligned} \text{复合地基承载力: } f_{spk} &= (1+m(n-1)) f_{sk} \\ &= (1+0.095 \times 5) \times 129 \\ &= 190.3\text{kPa} > 180\text{kPa}, \text{ 满足设计要求。} \end{aligned}$$

经计算沉降也满足设计要求。

4 施工效果

施工后经第三方检测机构检测, 复合地基承载力都满足设计要求, 且后期沉降观测, 地基沉降较小, 表明经处理后复合地基承载力和压缩模量有明显提高, 满足工程设计要求。

4.3 刚性夯扩挤密桩复合地基的设计

4.3.1 刚性夯扩挤密桩复合地基由于增强体为刚性桩, 刚性桩具有两个特点, 其一单桩承载力较散体桩有较大提高, 其二桩身材料具有粘结强度。与夯扩挤密散体桩复合地基相比, 刚性夯扩挤密桩复合地基承载力提高显著。刚性夯扩挤密桩宜用于地基承载力要求较高的工程, 其和散体夯扩挤密桩复合地基一样, 在提高复合地基承载力的同时还能消除地基土的液化或湿陷, 一种工艺两种功效。根据目前工程经验, 刚性夯扩挤密桩复合地基处理后最大承载力可达 300kPa , 当设计超过 300kPa 时应在设计前进行载荷试验验证参数和施工工艺的可行性。

4.3.4 刚性夯扩挤密桩复合地基承载力发挥以增强体为主, 故桩间距主要根据复合地基承载力要求确定, 但当复合地基处理要兼顾改善地基土的特性时, 要结合桩间土的土性, 考虑桩间土的挤密效果综合确定设计桩间距。

4.3.5 刚性夯扩挤密桩复合地基增强体的承载力较高, 本标准参照行业标准 JGJ 135《建筑地基处理技术规范》中有粘结强度复合地基承载力计算公式, 结合夯扩挤密桩自身的特点, 提出按公式(4.3.5)、(4.3.6)进行刚性夯扩挤密桩复合地基承载力计算。

以下为某刚性夯扩挤密桩复合地基工程设计案例。

1 工程概况

拟建场地位于北京昌平区东关, 南环路南侧, 龙水路东侧。地上 15 层, 要求处理后复合地基承载力特征值不小于 240kPa 。

2 地质条件

第①层杂填土：杂色，湿~饱和，松散~稍密，土质极为不均，主要成份为房渣土、碎石、砖块、灰渣、瓦块、混凝土块及垃圾。局部有大的混凝土块；本层局部夹①₁层黏质粉土素填土、①₂层卵石素填土、①₃层细中砂素填土。

①₁层黏质粉土素填土：黄褐色，湿，稍密，主要以黏质粉土为主，含少量砖屑、灰渣、碎石等。

①₂层卵石素填土：以卵石、碎石为主，一般粒径1~4cm，最大粒径大于10cm，含漂石，级配差。含少量砖屑、黏性土。

①₃层细中砂素填土：黄褐色，湿~饱和，中密，以细砂、中砂为主，含少量砾砂、卵石等。

本层及夹层层厚6.4~12.4m，层底标高介于45.01~50.70m之间。

第②层卵石层：杂色，湿~饱和，密实，一般粒径3~5cm，最大粒径12cm，以沉积岩为主，亚圆形，级配较好，中细砂充填，约占总重30~35%。本层局部夹②₁层中砂层、②₂层黏质粉土层。本层局部缺失，个别孔未完全揭露本层。

本层及夹层厚3.8~9.1m，层底标高介于39.64~42.31m之间。

第③层黏质粉土、粉质黏土：褐黄色，湿~饱和，中密，可塑，含云母，氧化铁及少量粗颗粒。

本层夹③₁层中粗砂层：褐黄色，湿~饱和，中密~密实，含云母、石英，局部含少量砾砂及卵石。

第④层细中砂：黄褐色，饱和，密实，含云母、石英、圆砾等。本层仅在23#钻孔中揭露。

典型地层剖面见图2。地基土的物理力学参数指标见表2。

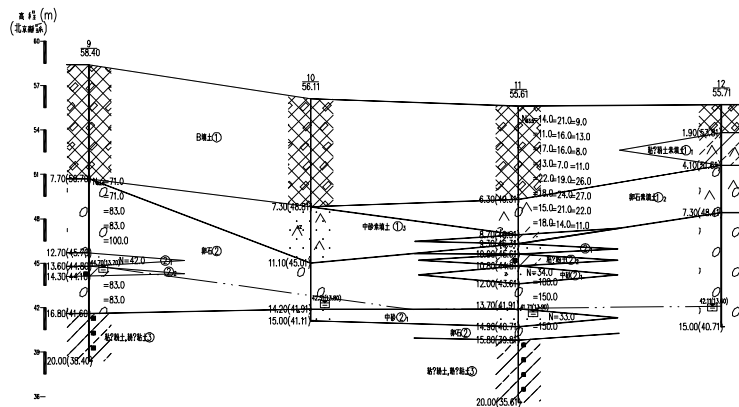


图2 典型地层剖面

表2 土的物理力学指标

编号	岩性	w (%)	e	γ (g/cm ³)	重型动探 (击)	E_s (MPa)	q_{si} (kPa)	q_p (kPa)	f_{ak} (kPa)
①	杂填土	/	/	/	12	/	/	/	50
① ₂	卵石填土	/	/	/	22	/	/	/	80
②	卵石	/	/	/	92	35	60	1500	250
③	粘质粉土	23.4	0.684	1.99	/	9	30	500	170
④	细中砂	/	/	/	32	25	/	/	220

3 复合地基设计

1) 设计参数

由于复合地基承载力要求较高，桩身选用干硬性混凝土，强度为 C20。夯扩挤密桩设计桩径为 550mm，桩端持力层选第②层卵石（以桩端进入第②层卵石不小于 50cm 控制），根据工程地质报告剖面，有效桩长约为 5.0 m~7.0m，正方形布桩，桩间距为 $1.8 \times 1.8\text{m}^2$ 。

2) 复合地基设计

①增强体单桩竖向承载力特征值按下式估算：

$$R_a = u_p \sum q_{si} l_i + \alpha_p q_p A_p$$

考虑到施工后地基土被挤密，消除欠固结，侧阻取值为 20kPa。

$$R_a = 3.14 \times 0.55 \times (20 \times 5 + 1 \times 60) + 0.9 \times 0.2375 \times 1500 = 597\text{kN}$$

复合地基置换率 $m = (3.14 \times 0.55^2 / 4) / (1.8 \times 1.8) = 0.0733$

②根据复合地基承载力计算公式

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m)f_{sk}$$

带入参数计算得 $f_{spk} = 258\text{kPa} > 240\text{kPa}$ ，满足设计要求。

经沉降验算，复合地基沉降满足规范和设计要求。

③桩身强度验算

根据验算，复合地基增强体桩身强度也满足。

4) 复合地基检测

施工完毕后经检测，所有试点复合地基承载力都满足设计要求，加载到 360kPa，最大平均变形值约为 21mm。表明处理效果非常好。

4.3.6 刚性夯扩挤密桩复合地基施工时，对桩端地基土有一定的挤密效果，因此端阻比普通直杆桩端阻大，一击贯入度越小，桩端挤密效果越好，端阻提高越大，因此单桩承载力计算时端阻取值应根据地区经验确定，没有经验时可按国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007 进行取值。

4.3.7 传统混凝土桩桩身强度通过 28 天试块强度试验确定，但刚性夯扩挤密桩施工材料的含水量不大，无法直接留置试块。桩身材料试块 28 天的抗压强度可以通过两种方法，其一，通过经验确定，通过收集之前桩身取芯的抗压强度，总结确定；其二，将施工拌合料加入适当的水拌合制成试块，标养后再进行试验，对试验强度进行适当折减作为桩身 28 天抗压强度。试块强度与实际桩身相比有两点差异：试块含水量提高，水化反应更充分，但实际夯扩施工的桩身，其密实度大于留试块的密实度，根据经验一般按试块试验强度的 80%~90%取值。

5 施工

5.1 施工设备

5.1.1 夯扩挤密桩设备主要有两大类：锤击跟管设备和振动沉管设备。挤密桩施工设备包括桩架、夯锤、控制设备及其他施工配套设备。

锤击跟管施工设备受施工限制，最长施工桩长一般不宜超过 13m，该施工设备适用于黏性土、粉土和松散的砂土；振动沉管设备采用动力头振动沉管，最大施工深度更大，可用于黏性土、粉土和砂土。当两种工艺成孔都较为困难时，可采用长螺旋和旋挖等设备配合引孔。

5.1.2 夯扩挤密桩施工一般都采用带护筒施工，由于填料夯实对桩侧土的挤密，因此一般护筒直径比设计桩径小，护筒与桩径的差异与桩侧土的挤密程度和密实控制指标相关，当桩侧土为孔隙比大含水量低的地基土，施工一击贯入度小时，实际成桩桩径与护筒直径相差更大，因此应根据设计桩径和桩侧土土性选择合适的护筒。

5.1.3 施工桩锤的直径应该与护筒相匹配，理论上应保证在柱锤和护筒中心对中时，柱锤外侧和护筒内侧的距离不小于 2cm，保证填料的夯实效果，若护筒与锤的直径相差过大，夯实时填料会从柱锤和护筒之间的孔隙挤出，影响挤密效果。受施工条件限制没有大直径柱锤时，可在柱锤底部向上一定范围内焊接钢条增加锤端部面积。

5.1.4 传统夯扩挤密桩施工采用人工操作，施工质量受施工人员的影响较大。随着科技的发展，全自动信息化控制的装备应用于载体桩施工，包括成孔深度、施工填料量、一击贯入度的测量和记录，都可以通过信息化设备自动完成。因此施工宜采用信息化设备，该设备可全程控制施工，并记录每次柱锤的提升高度和下沉深度、护筒下沉位置、每次填料体积和一击贯入度等参数，实现施工中全过程电脑控制，确保施工质量，还能实现施工参数的共享。

5.2 施工材料

5.2.1 所有原材料都应该进行入场检验，当以固化土作为施工材料时，由于固化剂种类繁多，不同固化剂成分不同，与土拌合后强度也不同，因此在施工前应对固化剂进行试验，确保固化剂能满足桩身强度要求。

5.3 施工

5.3.3 夯扩挤密桩施工属于挤土施工，包括成孔挤土和填料夯实，对桩侧周围的挤土较为明显，因此

施工前应重点调查施工周边的管线、建筑物等，并评估施工对周围环境的影响，防止对管线的损坏。

5.3.7 夯扩挤密桩施工受地基土影响较大，应在施工前进行成桩工艺试验，包括施工成孔工艺的可行性，有些地质采用锤击跟管工艺无法成孔时，可采用长螺旋或旋挖等传统工艺配合施工。没有工程经验的地区还应验证设计参数的可行性，设计中最关键指标为一击贯入度，一击贯入度并非越小越好，某些可加固性较差的土，若一击贯入度太小，施工中可能引起邻桩的破坏，达不到预期效果。

5.3.8 夯扩挤密桩一般都带护筒施工，护筒直径应与桩身直径相匹配，厚度应该满足施工的刚度要求。当成孔不塌孔且施工材料为填土、素土、碎石等非胶凝材料时，也可不带护筒施工。

5.3.9 夯扩挤密桩的施工包括成孔、填料夯实何一击贯入度测量，施工工艺流程见图 4。

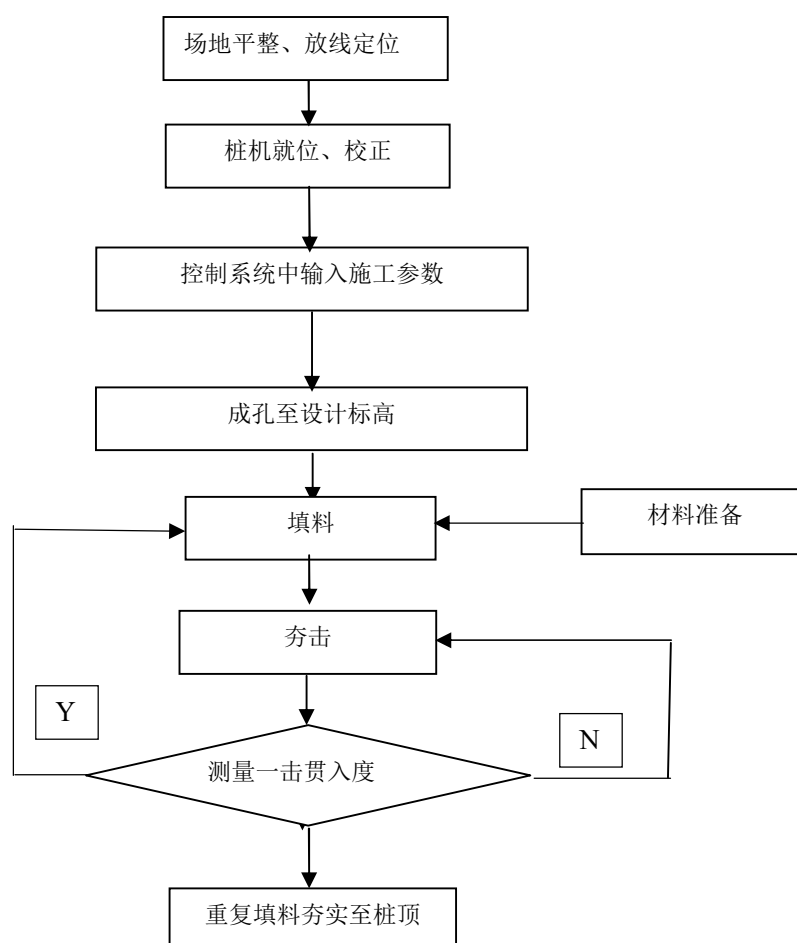


图 4 夯扩挤密桩施工工艺流程

5.3.10 夯扩挤密桩施工原理是在一定侧向约束下填料夯实，实现桩身和桩侧土体的密室，填料位置越深，侧向约束越大，挤密效果越好。在浅层地基施工时，由于侧向约束小，若采用高能量夯实，不仅起不到夯实效果，还会引起浅层地基的隆起，造成邻桩破坏，因此在桩顶以下一定范围内施工时应降低夯锤的落距，减小夯击能量。

由于施工完毕后桩顶标高附件的桩侧土被扰动或隆起，会影响复合地基受力，因此施工完毕后应对施工面进行满堂碾压或低能量夯实。

6 质量检验与验收

6.2 施工后

6.2.1 桩侧土的挤密效果非常关键，除了影响复合地基增强体的侧向约束从而影响承载力外，也将直接影响复合地基的承载力，因此复合地基施工的检测除了桩身质量和复合地基承载力检测外，还应进行桩侧土的挤密效果检测，一般采用标贯试验或动力触探检测，但要确定桩侧土的检测指标要求较为困难，可根据地区经验、提前复合地基相关试验或结合现场取样进行土工试验，确定桩侧土的验收指标。