

GDJT

广东省交通运输厅指导性技术文件

GDJT ***-**-***

加芯水泥土搅拌桩复合地基技术指南 (送审稿)

Construction Guide for Composite Foundation
of Coring Cement-soil Mixing Pile
in Guangdong Province

广东省交通运输厅发布

前 言

广东珠三角地区广泛分布有深厚软土，由于软土具有含水率高、强度低、渗透性差等特点，地基沉降和路基稳定等问题是软土地区修建铁路面临的主要问题。近些年来，广东铁路建设规模和体量不断扩大，深厚软基区域的地基处理技术对广东省区域内铁路工程建设和运维至关重要。加芯搅拌桩（混凝土芯水泥土搅拌桩）是在水泥土搅拌桩中加入（压入或现场灌注）混凝土芯桩组成，是一种我国自主研发的符合国情、省情的新型复合桩。它将混凝土桩和水泥土搅拌桩的技术综合应用，有机组合融为一体，发挥各自优点，取长补短，可有效提高地基承载力和减小沉降。本指南适用于广东省铁路工程加芯搅拌桩地基处理的设计计算、施工和质量检验，为施工质量提供保障，同时为珠三角地区类似地质条件下地基加固方案的选择提供有效借鉴。

本指南共 7 个章节。第 1 章总则；第 2 章术语与符号；第 3 章基本规定；第 4 章物理性质及岩土工程勘察；第 5 章设计；第 6 章施工；第 7 章质量检验和工程验收；附录。

本指南主要规定的内容有：加芯搅拌桩复合地基的勘察、设计、施工、质量检验、工程验收及有关附录。

本指南由广东省交通厅铁路处负责管理和对强制性条文的解释，由广东省铁路建设投资集团有限公司、广东珠肇铁路有限责任公司、中山大学、广东省铁路规划设计研究院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见和建议，请寄送广东珠肇铁路有限责任公司（地址：广东省广州市天河区黄埔大道中 668 号，邮政编码：510000）。

目 录

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	6
4	勘察要点	11
5	设 计.....	13
5.1	一般规定	13
5.2	选型与布置	13
5.3	构造要求	16
5.4	承载力计算	17
5.5	变形计算	23
5.6	稳定性验算	26
6	施 工.....	30
6.1	施工准备	30
6.2	施工机械	31
6.3	施工作业	32
6.4	施工安全	43
7	质量检验与工程验收	45

7.1 质量检验	45
7.2 施工前检验	45
7.3 施工中检验	46
7.4 施工后检验	48
7.5 完整性检验	49
7.6 承载力检验	50
7.7 工程验收	51
附录 A 加芯搅拌桩施工记录表	52
附录 B 施工中常见问题及处理	53
附录 C 施工质量检验标准	54
附录 D 室内水泥土抗压强度试验要点	57
本指南用词说明	61
本指南引用标准名录	62

1 总 则

1.0.1 为了在铁路工程建设中推广应用加芯搅拌桩（混凝土芯水泥土搅拌桩）技术，确保铁路工程地基处理满足安全可靠、技术先进、经济合理、绿色环保等要求，制定本指南。

1.0.2 本指南适用于广东省高速铁路（正线除外）、城际铁路、客货共线铁路的加芯搅拌桩复合地基的勘察、设计、施工、检验及验收。

1.0.3 加芯搅拌桩复合地基加固软基工程应根据铁路等级、轨道类型、荷载大小、场地地质和环境条件、工期要求、施工技术条件等因素，因地制宜，合理选用桩型，优化布桩。

1.0.4 本指南系根据国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》（GB55003）、《建筑地基基础设计规范》（GB 50007）、国家行业标准《建筑地基处理技术规范》（JGJ 79）、国家行业标准《建筑桩基技术规范》（JGJ 94）、国家标准《建筑与市政工程抗震通用规范》（GB 55002）、《铁路桥涵地基和基础设计规范》（TB 10093）、《铁路特殊路基设计规范》（TB 10035）、《铁路路基设计规范》（TB 10001）、《铁路路基工程施工质量验收标准》（TB10414）的有关原则制定。采用加芯搅拌桩时，本指南未作规定的内容应符合国家现行有关标准、规范的规定；本指南的强制性标准条文执行《铁路桥涵地基和基础设计规范》（TB 10093）、《铁路特殊路基设计规范》（TB 10035）及《铁路路基设计规范》（TB 10001）有关规定。

2 术语、符号

2.1 术语

2.1.1 加芯搅拌桩（混凝土芯水泥土搅拌桩） concrete core mixing pile （CCM 桩）

在水泥土搅拌桩中加入（压入或现场灌注）芯桩后的新型复合桩。

2.1.2 芯桩 core pile

加芯搅拌桩的加强体，可由钢筋混凝土、素混凝土等材料制成。

2.1.3 外包体 outsourcing body

加芯搅拌桩中预制芯桩以外的细石混凝土、水泥土部分。

2.1.4 外界面 outer interface

加芯搅拌桩中水泥土与桩侧土间的界面。

2.1.5 内界面 inner interface

加芯搅拌桩中水泥土与芯桩间的界面。

2.1.6 短芯搅拌桩 short-core mixing pile （SCM 桩）

芯桩端面高于搅拌桩端面，芯桩桩长小于芯桩直径（边长）且不大于 800mm。

2.1.7 等芯搅拌桩 equal-core mixing pile （ECM 桩）

芯桩端面低于搅拌桩端面，对粘性土、粉土芯桩桩长小于 2 倍芯桩直径（边长），砂土小于 1.5 倍芯桩直径（边长）。

2.1.8 长芯搅拌桩 long-core mixing pile （LCM 桩）

芯桩端面低于搅拌桩端面，对粘性土、粉土芯桩桩长不小于 2 倍芯桩直径（边长），砂土不小于 1.5 倍芯桩直径（边长）。

2.1.9 加芯搅拌桩复合地基 core mixing pile composite foundation
以加芯搅拌桩为竖向增强体的刚性桩复合地基。

2.2 符 号

2.2.1 作用和作用效应

G_p —基桩自重，地下水位以下取浮重度；

G_{gp} —群桩基础所包围体积的桩土总自重除以总桩数，地下水位下取浮重度；

H_{ik} —荷载效应标准组合下，作用于第*i*根基桩的水平力；

H_{Eik} —地震作用效应和荷载效应标准组合下，作用于第*i*根桩的水平力；

N_K —荷载效应标准组合轴心竖向力作用下基桩的平均竖向力；

N_{Kmax} —荷载效应标准组合偏心竖向力作用下，桩顶最大竖向力(kN)；

N_{EK} —地震作用效应和荷载效应标准组合下，基桩的平均竖向力；

N_{EKmax} —地震作用效应和荷载效应标准组合下，基桩的最大竖向力；

N —荷载效应基本组合下的桩顶轴向压力设计值；

N_t —荷载效应基本组合下的桩顶轴向拉力设计值。

2.2.2 抗力和材料性能

f_{sk} —桩间土承载力特征值；

f_{spk} —复合地基承载力特征值；

f_{spa} —修正后的复合地基承载力特征值；

f_{ck} — 芯桩混凝土轴心抗压强度，取混凝土强度等级的1/2；
 f_{cu} — 与搅拌桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块（边长为70.7mm 立方体）在标准养护条件下28天龄期的立方体抗压强度平均值；
 q_{sia} — 搅拌桩有芯桩段第 i 层土侧阻力特征值；
 q_{si} — 搅拌桩无芯桩段第 i 层土侧阻力特征值；
 q_p — 搅拌桩端地基土未经修正的承载力特征值；
 q_{sia}^c — 长芯搅拌桩相应于芯桩桩型第 i 层土的桩侧阻力特征值；
 q_{pa}^c — 长芯搅拌桩芯桩端阻力特征值；
 R_a — 单桩竖向承载力特征值；
 E_s — 桩间土的压缩模量；
 E_p — 桩体压缩模量；
 E_c — 芯桩混凝土弹性模量。

2.2.3 几何参数

A — 基础底面积；
 A_p — 搅拌桩截面积；
 A_f — 搅拌桩侧表面积；
 A_c — 芯桩截面积（等截面）或芯桩在某点截面积（不等截面）；
 A_c^t — 芯桩顶端截面积；
 A_c^b — 芯桩底端截面积；
 A_{cf} — 搅拌桩桩长范围内芯桩侧表面积；
 m — 面积置换率；

m_c — 长芯搅拌桩下段芯桩段面积置换率;

L — 搅拌桩桩长;

l — 芯桩长;

D — 搅拌桩直径;

d_c (h_c) — 芯桩直径 (边长);

u_p — 搅拌桩周长;

u_c — 芯桩周长。

2.2.4 计算系数

α — 桩端天然地基土承载力折减系数;

β — 桩间土承载力折减系数;

ζ_c — 芯桩侧阻力换算系数;

η — 水泥土强度折减系数;

ξ — 搅拌桩桩周侧阻力调整系数;

ψ_c — 芯桩工作条件系数。

2.2.5 技术特征参数

$t_l = l/L$ — 芯桩长度比 (芯长比);

$t_c^t = A_c^t/A_p$ — 桩顶芯桩含芯率 (管形芯桩面积 A_c^t 取管外径计算);

$t_c^b = A_c^b/A_p$ — 芯桩下端含芯率;

$t_{cf} = A_{cf}/A_f$ — 芯桩侧面积比;

3 基本规定

3.0.1 加芯搅拌桩的类型

1 A 型 预制混凝土短芯搅拌桩：芯桩为各种倒棱台形、倒圆台形、柱形、管形，常用为倒四方棱台形（方楔形）、方柱形、圆管形、方管形。

2 B 型 灌注混凝土短芯搅拌桩：芯桩为各种形状柱形，常用为圆柱形。

3 C 型 预制混凝土长芯搅拌桩：芯桩为各种倒棱台形、倒圆台形、柱形、管形，常用为方柱形、圆管形、方管形。

4 D 型 灌注混凝土长芯搅拌桩：芯桩为各种形状柱形，常用为圆柱形。

3.0.2 加芯搅拌桩可作为复合地基的增强体、基坑的围护、边坡支护挡墙等，适用于处理正常固结的淤泥与淤泥质土、粉土、素填土、黏性土以及无流动地下水的饱和松散砂土等地基。

3.0.3 加芯搅拌桩处理泥炭土、有机质土、PH 值小于 4 的酸性土、塑性指数大于 25 的黏土或在无工程经验的地区使用时应通过室内或现场试验确定其适应性。

3.0.4 单桩竖向抗压承载力较低的加芯搅拌桩可作为复合地基增强体，与桩间土共同工作组成刚性桩复合地基，应符合以下要求：

1 应在桩顶设置加筋垫层，厚度宜为 200mm~500mm；加筋砂垫层应采用砾砂，粗砂、中砂，加筋碎石垫层应采用级配良好且未风化的砾石或碎石，其最大粒径不宜大于 50 mm。垫层材料不应含草根、

垃圾等杂质，碎石垫层细粒含量不应大于 10%，砂垫层细粒含量不应大于 5%，用作排水固结的砂垫层细粒含量不应大于 3%。工程要求垫层具有排水功能时，垫层材料应具有良好的透水性；加筋垫层土工合成材料应选用耐久性好的土工格栅、土工格室或土工织物等，应具有高强度，低延伸率，蠕变性小、不易脆性破坏，抗拔能力强，耐腐蚀和耐久性好等性能。加筋垫层施工质量应满足复合地基设计承载力要求。宜做混凝土桩帽，插入加筋垫层内 50~100mm。

2 土层上硬下软，桩端为软弱土，可使桩直接嵌入混凝土基础内，加筋砂垫层在桩身以外区域铺设。宜做混凝土桩帽且桩顶主筋锚入基础至少 35 倍直径。

3 芯桩桩径（边长）不宜小于 200mm，桩端无芯段长度宜取 $(0.10 \sim 0.15) L$ ，且不宜大于 2m。

3.0.5 广东省各地工程地质比较复杂，确定处理方案前必须具有具备资质的勘察单位提供的准确、可靠、详尽的岩土工程勘察报告，尤其是填土层、软土层、持力层和下卧层的深度、厚度、分布范围以及土的工程物理力学性质及必要的设计参数。

3.0.6 加芯预制芯桩复合桩基础设计分为甲、乙、丙三个设计等级，等级划分应符合现行国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 和行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ94 的规定，设计时应确定设计等级。

3.0.7 加芯搅拌桩地基基础设计主要内容：

1 根据结构对地基承载力和变形的要求和地质条件，确定加芯水泥土搅拌桩的单桩承载力和复合地基承载力，选择合理的桩长、桩径、置换率，进行必要的沉降验算和稳定性计算。

2 根据技术特征参数，进行芯桩优化设计。

3 绘制施工图，提供设计文件；同一工程使用同一设备，可以采取不同桩径、不同桩长和不同芯桩的布桩设计。

4 铁路地基加固要求加芯搅拌桩中搅拌桩的桩径 D 不应小于 500mm，一般为 500~700mm，同时桩径不宜小于芯桩上端直径加 200mm 或芯桩边长对角线加 150mm；搅拌桩长径比 L/D 宜小于 40。

3.0.8 水泥土配比、抗压强度及成桩试验要求：

1 当无类似的加芯搅拌桩工程经验时，设计前应进行室内水泥土的配比实验，针对最弱层软土的性质，选择合适的水泥掺量、水灰比、外掺剂种类和掺量等技术参数，为施工方提供 28d 龄期的水泥土强度参数。

2 室内水泥土抗压强度试验宜符合本指南附录 D 的规定，与桩身水泥土配比相同的室内边长 70.7mm 立方体水泥土试件在标准养护条件下 28d 龄期的抗压强度平均值由设计确定，且不应低于 3MPa。

3 水泥宜选用 42.5 级以上普通硅酸盐水泥或矿渣水泥，掺灰量可取被加固土体质量的 12%~20%，土质松软时应加大掺入量，外掺剂可根据工程需要选用具有早强、缓凝、改善工艺性、节省水泥、抗腐蚀性等作用的材料，水灰比一般可选用 0.6~1.2，水胶比宜为 0.45~0.55。

3 对地基基础设计等级为甲、乙级的加芯搅拌桩的复合地基，应在施工前进行成桩试验，在同一条件下的试桩数量不应少于 3 根，且不宜超过 1%，当总桩少于 50 根，试桩数量可取 2 根；对地基基础设计等级为丙级的加芯搅拌桩的复合地基，宜按施工组织设计进行工艺性试桩，进行单桩静载试验。以验证搅拌桩均匀性及成桩直径，确定操作参数和施工工艺；并通过载荷试验提供单桩及复合地基承载力特征值，作为设计、施工依据。

3.0.9 加芯搅拌桩地基竣工验收时，承载力检验应采用单桩竖向静载荷试验和多桩或单桩复合地基竖向静载荷试验。

3.0.10 竖向承载加芯搅拌桩的高速铁路、无砟轨道铁路路基应进行沉降评估，设计速度 200 km/h 及以下有砟轨道铁路在软土、松软土等特殊路基应进行沉降变形观测与评估，直至沉降达到稳定为止。变形观测应满足下列要求：

1 路基变形观测应以路基面沉降和地基沉降观测为主，软土地段路堤填筑期间尚应对路基坡脚水平位移进行观测，控制填筑速率，保证路基稳定。

2 变形观测断面及观测设施的布置应根据地形地质条件、地基处理方法、路基类型、路堤高度等因素结合施工工期综合确定，观测断面间距宜为 50m~100m。

3 变形观测方法和精度应满足不同等级铁路相关规范要求，路基施工开始后应进行连续观测，路基填筑完成或施加预压荷载后沉降观测时间不宜少于 6 个月。观测数据不足以评估或工后沉降评估不能符

合要求时，应延长观测期，必要时可采取加速或控制沉降的措施。

4 勘察要点

4.0.1 对根据初步勘察或附近场地地质资料和地基处理经验初步确定采用加芯搅拌桩复合地基处理方案的场地，进一步勘察前应搜集附近场地的地质资料及地基处理经验，并结合工程特点和设计要求，明确勘察任务和重点。

4.0.2 控制性勘探孔的深度应满足加芯搅拌桩复合地基沉降计算的要求；需验算地基稳定性时，勘探孔布置和勘察孔深度应满足稳定性验算的需要

4.0.3 拟采用加芯搅拌桩复合地基的场地，其岩土工程勘察应包括下列内容：

1 搜集沿线的地形、地貌、工程地质、水文地质、气象等资料，评价场地范围内地基处理对临近管线、建（构）筑物等影响。

2 查明地基土的厚度与组成情况，包括含水率、密实度、塑性指数、胶接情况、有机质含量、地下水腐蚀性、水位和 pH 值等。

3 对于软土，应查明成因类型，分布特征，分析固结历史、结构性和灵敏度，评价软土地基的稳定性和均匀性。

4 查明大粒径块石、地下洞穴、植物残体、管线、障碍物等可能影响复合地基中增强体施工的因素，

5 查明地基影响范围内地下水的埋藏条件、类型、水位及其变化。地下水的埋藏条件包括地下水的层数及赋存特性（含水层、补给与排泄、蒸发等特性）。水位应包括勘察时的稳定水位或承压水头标高，以及对历史高水位的调查结果；“水位变化”为地下水动态变化的年变

幅和极值发生的时段。

5 应查明拟采用的加芯搅拌桩复合地基中增强体的侧摩阻力、端阻力及土的压缩曲线和压缩模量，对柔性桩(墩)应查明未经修正的桩端土地基承载力。对软黏土地基应查明土体的固结系数。

6 对需要进行稳定分析的加芯搅拌桩复合地基应查明黏性土层土体的抗剪强度指标以及土体不排水抗剪强度。

7 加芯搅拌桩复合地基中增强体施工对加固区土体挤密或扰动程度较高时，宜测定增强体施工后加固区土体的压缩性指标和抗剪强度指标。

8 路堤、堤坝、堆场工程的复合地基应查明填料或堆料的种类、重度、直接快剪强度指标等。

5 设计

5.1 一般规定

5.1.1 加芯搅拌桩复合地基设计前应收集地质、路基等资料，调查地形地貌、临近建（构）筑物、地下工程和管线埋设等，确定地基处理目的、处理范围和处理要求等。

5.1.2 加芯搅拌桩复合地基应满足承载力、容许工后沉降和稳定性要求，其设计尚应符合下列规定：

1 当在受力层范围内仍存在软弱下卧层时，应进行软弱下卧层地基承载力验算；

2 对承受较大水平荷载或位于坡地、岸边的复合地基应进行稳定性分析。

5.1.3 水泥应选用强度等级为 42.5 级及以上的普通硅酸盐水泥、水泥掺量不宜小于被加固土质量的 15%。

5.1.4 桩身水泥土抗压强度不应低于 1.0MPa。

5.1.5 褥垫层宜采用中砂、粗砂、级配砂石或碎石，砂石粒径不宜大于 20mm；褥垫层厚度不宜小于芯桩直径或边长的 0.5 倍，且宜为 150mm~700mm。

5.2 选型与布置

5.2.1 选型原则

1 用于复合地基增强体单桩承载力要求不高，且浅层地基土无良好的桩端持力层时，宜优先选用短芯搅拌桩；用于桩基单桩承载力要

求较高，且地表下定深度范围内存在较好桩端持力层时，宜优先选用长芯搅拌桩。

2 短芯搅拌桩长度及长芯搅拌桩的上段水泥土搅拌桩有效桩长一般不宜大于 15m，进行 15m 以内浅层地基处理时，宜优先选用短芯搅拌桩；进行大于 15m 深层地基处理时，宜优先选用长芯搅拌。

3 短芯搅拌桩用于复合地基增强体时，如果芯桩已穿透软弱土层，允许设计采用含芯率较低、芯桩长度比较小的技术特征参数，但芯桩的长度不宜小于搅拌桩长度的 2/3；也可采用长芯搅拌桩复合地基或长短桩相结合的复合地基。

4 芯桩可分为预制混凝土管、空心方桩、实心方桩、沉管灌注桩，芯桩的选型应按表 5.1.1 的规定采用。

表 5.2.1 芯桩选型

芯桩类型		混凝土强度等级
管桩	预应力高强混凝土管桩(PHC)	C80
	预应力混凝土管桩(PC)	C60
	预应力混凝土薄壁管桩(PTC)	C60
	混合配筋管桩(PRC)	C80
空心方桩	预应力高强混凝土空心方桩(PHS)	C80
	预应力混凝土空心方桩(PS)	C60
实心方桩		≥C40
沉管灌注桩		≥C30

5 预制芯桩复合体桩外包体厚度宜为 50mm~200mm，其中水泥土复合桩取 150mm~200mm，钻孔灌注复合桩取 50mm~100mm，桩芯采用预应力方桩时，外包体厚度为方桩角部厚度。

6 短芯搅拌桩芯桩长 $l \leq 10\text{m}$ 时，宜优先选用倒棱台形(如方楔形、平板楔形)预制混凝土芯桩；芯桩长 $l > 10\text{m}$ 时，宜选用沉管灌注混凝土芯、预应力管桩。

7 长芯搅拌桩芯桩宜优先选用沉管灌注桩、预应力管桩。

5.2.2 加芯水泥土搅拌桩桩长确定应符合以下规定：

1 水泥土加芯搅拌桩桩长不宜超过 30m；

2 竖向承载搅拌桩的长度应根据上部结构对承载力、稳定和变形的要求确定，并宜穿透软弱土层到达承载力相对较高的土层；

3 宜选择中、低压缩性土层作为桩端持力层。对长芯、等芯加芯搅拌桩，搅拌桩端面不应高于持力层上界面。当存在软弱下卧层时，桩端以下持力层厚度对长芯、等芯加芯搅拌桩不宜小于 $3d_c$ ，对短芯加芯搅拌桩不宜小于 $2d_c$ ；

4 为提高抗滑稳定性而设置的搅拌桩，其桩长应超过危险滑弧以下不小于 2m。

5.2.3 芯桩直径与水泥土桩直径（边长）应符合下列规定：

1 水泥土桩直径与芯桩直径（边长）之差不应小于 300mm；

2 与芯桩直径（边长）匹配的水泥土桩直径可参考表 5.1.3 取值，长径比较大者、水泥土掺灰量较底者取小值，采用方桩时取大值。当用于 8 度 IV 类场地土地区时， D 可小于表中的下限值，但应满足本条第 1 款的规定。

表 5.2.3 芯桩直径（边长）与相应的水泥土桩直径（单位：mm）

d_c	400	500	600	800
D	700~900	800~1000	1000~1200	1200~1500

注： d_c -芯桩直径或方桩边长 D -搅拌桩直径

5.2.4 芯桩桩长与芯桩桩径（边长）之比不宜大于 65。

5.2.5 加芯搅拌桩的布置应符合下列规定：

1 加芯搅拌桩应根据上部结构类型、荷载情况及对地基承载力和

变形的要求采用正三角形、正方形或矩形布置；

2 加芯搅拌桩桩间距应根据基础形式、设计计算、土质条件及周边环境条件等综合确定，且不宜小于 $3D$ 。

5.2.6 加芯搅拌桩用于复合地基时可只在基础平面范围内布置,且可根据上部结构的需要灵活采用布桩型式。用于桩基时中心距不应小于 $3D$ 且不小于 4 倍芯桩上端边长(或直径)，独立基础下桩数不宜少于 3 根。

5.3 构造要求

5.3.1 加芯搅拌桩桩中心至承台边缘的距离应符合下列规定：

1 边桩中心至承台边缘的距离不宜小于芯桩直径（边长），且加芯搅拌桩外边缘至承台边缘的距离不应小于 100mm；

2 对条形桩基加芯搅拌桩外边缘至承台梁边缘的距离不应小于 50mm。

5.3.2 当芯桩采用管桩、空心方桩时，加芯搅拌桩与承台连接宜采用芯桩填芯混凝土中埋设锚固钢筋的连接方式，并符合以下规定：

1 芯桩嵌入承台内的长度，当芯桩直径（边长）小于 800mm 时不宜小于 50mm，当芯桩直径（边长）不小于 800mm 时不宜小于 100mm；

2 对于受压桩，填芯混凝土深度不应小于 5 倍芯桩直径(边长)，且不应小于 3m；对抗拔桩填芯混凝土深度应由计算确定，且不应小于 3m。对桩顶承受较大水平力的桩，不宜小于 8 倍芯桩直径(边长)，

当芯桩直径（边长） $\leq 500\text{mm}$ 时不宜小于 4.5m ， $> 500\text{mm}$ 时尚不宜小于 6m ；

3 填芯混凝土强度等级不低于承台混凝土强度等级，且不应低于 C30，应采用无收缩混凝土或微膨胀混凝土。混凝土限制膨胀率和限制干缩率的测定应按现行国家标准《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 的规定执行；

4 对于抗压桩，填芯混凝土中锚固钢筋配筋率按芯桩外径实心截面计算当 $d \leq 500\text{mm}$ 时不宜小于 0.6% ， $d \geq 800\text{mm}$ 时不宜小于 0.4% 中间按插入计算，数量不宜少于 4 根，对抗拔桩和桩顶承受较大水平力的桩，锚固钢筋面积应由计算确定且配筋率不应小于 0.6% 。箍筋规格采用 $\phi 6 \sim \phi 8$ ，间距不宜大于 150mm ；

5 填芯混凝土中应通长配置锚固钢筋；

6 锚固钢筋锚入承台内长度：受压桩不应小于 35 倍钢筋直径；

5.4 承载力计算

5.4.1 单桩竖向承载力计算应符合以下规定：

1 荷载效应标准组合：

轴心竖向力作用下

$$N_K \leq R_a \quad (5.4.1-1)$$

偏心竖向力作用下，除满足上式外，尚应满足下式要求：

$$N_{k\max} \leq 1.2R_a \quad (5.4.1-2)$$

2 地震作用效应和荷载效应标准组合：

轴心竖向力作用下

$$N_{EK} \leq 1.25R_a \quad (5.4.1-3)$$

偏心竖向力作用下除满足上式外，尚应满足下式要求：

$$N_{EKmax} \leq 1.5R_a \quad (5.4.1-4)$$

式中： R_a ——单桩竖向承载力特征值(kN)；

N_K ——荷载效应标准组合轴心竖向力作用下基桩的平均竖向力(kN)；

N_{Kmax} ——荷载效应标准组合偏心竖向力作用下，桩顶最大竖向力(kN)；

N_{EK} ——地震作用效应和荷载效应标准组合下，基桩的平均竖向力(kN)；

N_{EKmax} ——地震作用效应和荷载效应标准组合下，基桩的最大竖向力(kN)。

5.4.2 单桩竖向承载力特征值 R_a 应按下式确定：

$$R_a = \frac{1}{K} Q_{uk} \quad (5.4.2)$$

式中：

K ——安全系数，取 $K=2$ ；

Q_{uk} ——单桩竖向极限承载力标准值(kN)。

5.4.3 加芯搅拌桩单桩竖向承载力特征值宜按《建筑地基基础设计规范》GB50007 的相关规定通过单桩竖向静载荷试验确定。初步设计时加芯搅拌桩单桩竖向承载力特征值可按下列各式估算,取其中较小值为承载力特征值 R_a 。

1. 加芯搅拌桩桩侧破坏面位于内、外芯界面时，基桩竖向抗压承

载力特征值可按下列公式估算：

$$\text{长芯桩： } R_a = u^c q_{sa}^c l^c + u^c \sum q_{sja}^c l_j + q_{pa}^c A_p^c \quad (5.4.3-1)$$

$$\text{短芯桩和等芯桩： } R_a = u^c q_{sa}^c l^c + q_{pa}^c A_p^c \quad (5.4.3-2)$$

式中： R_a ——加芯搅拌桩单桩竖向抗压承载力特征值(kN)；

u^c ——加芯搅拌桩芯桩桩身周长 (m)；

l^c 、 l_j ——分别为加芯搅拌桩复合段长度和非复合段第 j 土层厚度 (m)；

A_p^c ——加芯搅拌桩芯桩桩身截面积 (m²)；

q_{sa}^c ——加芯搅拌桩复合段芯桩侧阻力特征值(kPa)，宜按现场试验取值，无试验资料时，对于外侧土体为淤泥质土时，该值可取 135kPa；其他土层时，该值可取 270kPa；

q_{sja}^c ——加芯搅拌桩非复合段内芯第 j 土层侧阻力特征值(kPa)，可按广东地区经验取值。也可根据芯桩桩型按现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 取值；

q_{pa}^c ——加芯搅拌桩芯桩桩端土的端阻力特征值(kPa)，宜按广东地区经验取值。对长芯桩与等芯桩也可根据芯桩桩型按现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 取值。

2. 加芯搅拌桩桩侧破坏面位于外芯和桩周土的界面时，基桩竖向抗压承载力特征值可按下列公式估算：

$$\text{长芯桩： } R_a = u \sum \varepsilon_{si} q_{sia} l_i + u^c \sum q_{sja}^c l_j + q_{pa}^c A_p^c \quad (5.4.3-3)$$

$$\text{短芯桩与等芯桩： } R_a = u \sum \varepsilon_{si} q_{sia} l_i + \alpha \varepsilon_p q_{pa} A_p^c \quad (5.4.3-4)$$

式中： u ——加芯搅拌桩复合段桩身周长 (m)；

l_i ——加芯搅拌桩复合段第 i 土层厚度 (m);

A_p ——加芯搅拌桩桩身截面积 (m^2);

q_{sia} ——加芯搅拌桩复合段外包体第 i 土层侧阻力特征值 (kPa)，宜按现场试验取值；无试验资料时，宜按广东地区经验取值，可参考表取值；

q_{pa} ——加芯搅拌桩端阻力特征值(kPa)，宜按广东地区经验取值。也可取桩端地基土未经修正的承载力特征值；

α ——加芯搅拌桩桩端天然地基土承载力折减系数，取 0.70~0.90；

ε_{si} ——加芯搅拌桩复合段外包体第 i 土层侧阻力调整系数，宜按广东地区经验取值，可取 1.4~1.6；

ε_p ——加芯搅拌桩复合段外包体第 i 土层端阻力调整系数，宜按广东地区经验取值，长芯搅拌桩可取 1，短芯搅拌桩可取 0。

表 5.4.2-1 加芯搅拌桩的外包体侧阻力特征值 q_{sia} (kPa)

土的名称	土的状态		侧应力特征值 q_{sia} (kPa)
人工填土	稍密~中密		10~18
淤泥	—		6~9
淤泥质土	—		10~14
黏性土	流塑	$IL > 1$	12~19
	软塑	$0.75 < IL \leq 1$	19~25
	可塑	$0.5 < IL \leq 0.75$	25~34
	硬可塑	$0.25 < IL \leq 0.50$	34~42
	硬塑	$0 < IL \leq 0.25$	42~48
	坚硬	$IL \leq 0$	48~51
粉土	稍密	$e > 0.9$	12~22

	中密	$0.75 < e \leq 0.9$	22~32
	密实	$e \leq 0.75$	32~42
粉砂	稍密	$10 < N \leq 15$	11~23
	中密	$15 < N \leq 30$	23~32
	密实	$N > 30$	32~43
细砂	稍密	$10 < N \leq 15$	13~25
	中密	$15 < N \leq 30$	25~34
	密实	$N > 30$	34~45

5.4.4 水泥土加芯搅拌桩中芯桩桩身混凝土轴心抗压强度设计值应按下列要求计算：

1 轴心抗压桩正截面受压承载力应符合下列规定：

$$N \leq \phi_c f_c A_c \quad (5.4.4-1)$$

式中： N ——相应与作用的基本组合时的单桩竖向力设计值(kN)，同时不应小于预制芯桩桩身受压承载力设计值；

ϕ_c ——工作条件系数，根据桩施工工艺对桩身可能造成的损伤程度确定，可取 0.85；对于 7 度设防区域或外包体为淤泥质土时，取 0.65；

f_c ——芯桩混凝土轴心抗压强度设计值(MPa)，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定取值；

A_c ——芯桩桩身截面面积(m²)。

2 当芯桩桩身抗压承载力不满足式(5.4.3-1)要求时，对管桩和空心方桩可计入外包体混凝土的承载能力，外包体混凝土深度应由计算确定；填芯混凝土深度范围内正截面受压承载力应满足下列公式要求：

$$N \leq \psi_c f_c A_c + 0.7 f_{c0} A_{c0} \quad (5.4.4-2)$$

式中： f_c 、 f_{co} ——芯桩混凝土、外包体混凝土轴心抗压强度设计值（kPa）；

A_{co} ——芯桩内腔截面面积（ m^2 ）。

5.4.5 在轴心竖向力、偏心竖向力、水平力作用下，加芯搅拌桩复合地基和桩基承载力特征值设计，应满足《建筑地基基础设计规范》GB50007、《建筑地基处理技术规范》JGJ79、《建筑桩基技术规范》JGJ94 的相关规定。

5.4.6 加芯搅拌桩复合地基承载力特征值可按下列方法之一确定。

1 现场单桩或多桩复合地基载荷试验，其试验要点和特征值确定应遵照《建筑地基处理技术规范》JGJ79 及本指南 7.6 条执行。

2 用载荷试验确定单桩竖向承载力特征值，并同时考虑折减后桩间土的作用，桩间土的承载力折减系数 β 可取 0.7。

3 按本条确定的复合地基承载力特征值，可以进行基础埋深修正，修正后的复合地基承载力特征值为 f_{spa} 。对填土、淤泥、淤泥质土、流塑或软塑粘性土埋深修正系数取 1.0，对其他土类埋深修正系数取 0.85， η_d ， η_d 见《建筑地基基础设计规范》GB50007-2011 第 5.2.4 条。

4 初步设计时，复合地基承载力特征值可按下列式估算：

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m)f_{sk} \quad (5.4.6-1)$$

式中： f_{spk} ——复合地基承载力特征值(kPa)；

λ ——单桩承载力发挥系数，应按广东地区经验取值，无经验时可取 0.95~1.0；

m ——面积置换率，可取 10%~20%；

R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值(kN);

β ——桩间土承载力发挥系数, 应按广东地区经验取值, 桩间土为淤泥、淤泥质土和流塑状等固结程度差时可取 0.1~0.4, 其他土层可取 0.4~0.8, 加固土层强度较高时取最高值, 桩端土层强度强度较高时取低值;

f_{sk} ——处理后桩间土承载力特征值(kPa), 应按广东地区经验确定; 无试验资料时可取天然地基承载力特征值。

5.5 变形计算

5.5.1 竖向承载加芯搅拌桩复合地基的变形,包括垫层压缩变形量、加固区复合土层压缩变形(s_1)和加固区下卧土层压缩变形(s_2)。加芯搅拌桩复合地基变形量可按下列公式计算:

$$s=s_1+s_2 \quad (5.5.1-1)$$

$$s_1 = \psi_{s1} \sum \frac{\Delta p_i}{E_{spi}} l_{0i} \quad (5.5.1-2)$$

$$s_2 = \psi_{s2} \sum \frac{\Delta p_i}{E_{si}} l_{0i} \quad (5.5.1-3)$$

$$E_{spi} = \frac{f_{spk}}{f_{aki}} E_{si} \quad (5.5.1-4)$$

式中: s ——复合地基变形量(mm);

s_1 、 s_2 --复合土层、加固区下卧土层压缩变形量(mm);

Δp_i ——第 i 层复合土层或土层的平均附加应力增量(kPa), 可采用 Boussinesp 法或应力扩散法计算;

l_{0i} ——计算深度范围内第 i 层复合土层或土层的厚度(m);

E_{spi} ——第 i 层复合土层的复合压缩模量(MPa), 可通过面积加权

平均法得到： $E_{spi} = mE_{pi} + (1-m)E_{si}$ ；

E_{si} ——第 i 层土层的压缩模量(MPa)；

E_{pi} ——桩体压缩模量(MPa)；

ψ_{s1} ——复合土层压缩变形量计算经验系数，无地区经验时可按现行行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ79 的规定取值；

ψ_{s2} ——下卧土层压缩变形量计算经验系数，无地区经验时可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》CB50007 的规定取值；

f_{aki} ——基底以下各层天然地基承载力特征值(kPa)

5.5.2 地基压缩层计算深度应考虑铁路等级、轨道类型及地基土特性等因素综合确定。

1 高速铁路、无砟轨道地基。

1) 地基压缩系数 $a_{0.1-0.2}$ 大于等于 0.3 MPa^{-1} 时，地基压缩层的计算深度按下式确定：

$$\sigma_z = 0.1\sigma_l \quad (5.5.2-1)$$

式中： σ_z ——沉降计算深度 z 处的地基垂直附加应力(kPa)；

σ_l ——沉降计算深度 z 处的地基自重应力(kPa)。

2) 地基压缩系数 $a_{0.1-0.2}$ 小于 0.3 MPa^{-1} 时，地基压缩层的计算深度按下式 确定：

$$\sigma_z = 0.2\sigma_l \quad (5.5.2-2)$$

3) 计算深度以下有软土层时应继续增加计算深度。

2 其他铁路地基

软土地基压缩层的计算深度按式 5.3.2-1 计算。

其他地基压缩层的计算深度按式 5.3.2-2 计算。

5.5.3 工后沉降量应按下公式计算：

$$S_r = S - S_T \quad (5.5.3-1)$$

$$S_T = \eta S' \quad (5.5.3-2)$$

式中 S_r ——工后沉降量(m)；

S ——地基总沉降(包含轨道荷载和列车荷载作用)(m)；

S_T ——施工期沉降量(m)；

S' ——无荷状态(不考虑轨道荷载和列车荷载作用，采用堆载预压处理时按相应荷载状态计算)下地基总沉降量(m)；

η ——上部建筑物竣工或路基竣工铺轨时的沉降完成比例系数(或称施工期沉降完成比例系数)，应结合地基条件、地基处理措施、路基填筑完成放置时间及地区经验综合确定，无经验时可按表 5.5.3 取值。

表 5.5.3 施工期沉降完成比例取值

地基土类型	荷载稳定 3 个月	荷载稳定 6 个月	荷载稳定 12 个月
饱和软土（排水固结法处理）	按固结理论计算		
中低压缩性土（未加固）	80%~85%	85%~90%	90%~95%
中低压缩性湿陷性黄土（未加固）	—	90%~95%	—
膨胀土（未加固）	90%	—	—

注：中低压缩性土是指压缩系数为 $0.1 \text{ MPa}^{-1} \sim 0.3 \text{ MPa}^{-1}$ 的土。

5.5.4 铁路工程地基工后沉降及沉降速率应满足表 5.5.4 的要求。

表 5.5.4 铁路地基工后沉降控制限值

铁路类别	一般地段工后 沉降（mm）	桥台台尾过渡 段工后沉降 (差异沉	沉降速率 (mm/年)
------	------------------	-------------------------	----------------

					降)(mm)	
有砟轨道	客货共线铁路	200km/h		≤150	≤80	≤40
		200km/h以下	I级	≤200	≤100	≤50
			II级	≤300	≤150	≤60
	高速铁路	300 km/h、 350 km/h		≤50	≤30	≤20
		250 km/h		≤100	≤50	≤30
	城际铁路	200 km/h		≤150	≤80	≤40
		160 km/h、 120 km/h		≤200	≤100	≤50
	重载铁路		≤200	≤100	≤50	
无砟轨道				≤15	≤5	-

注：1 无砟轨道铁路不仅应满足差异沉降要求，还应满足不均匀沉降造成的折角不应大于 1/1000 的规定。

2 无砟轨道地基沉降比较均匀且调整轨面高程后的竖曲线半径大于 $0.4v^2$ 时 (v 为设计速度)，工后沉降控制限值为 30mm。

5.6 稳定性验算

5.6.1 铁路路基稳定性分析的强度参数，应根据土工试验和原位测试成果，并结合当地经验综合确定。

5.6.2 路基填料的物理力学指标应根据试验资料确定，无试验资料时可按照表 5.6.2 确定。

表 5.6.2 路堤填料物理力学指标

填料种类	黏聚力 $c(kPa)$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	容重(kN/m^3)
细粒土	20~25	20~25	18~20
砂类土	—	35	19~20
碎石类，砾石类土	5~10	35~40	20~21
不易风化的块石类土	5~10	40	21~22

注：1 填料的容重可根据填料性质和压实等情况作出适当修正。

2 全风化岩石，特殊土的 c 、 φ 值应根据试验资料确定。

5.6.3 地基土强度参数应根据不同检算工况，按表 5.6.3 确定。

表 5.6.3 地基土抗剪强度指标的试验方法

地基处理方法	检算工况	试验方法						
		直剪		三轴剪切			无侧限抗压强度	十字板剪切
		快剪	固结快剪	不固结不排水	固结不排水	固结排水		

复合地基法	施工期	√		√			△	△
	运营期	√	△	√	△			

注：1 表中所列项目考虑了施工期与运营期两种检算工况,实际工程中应根据不同检算工况选用。

2 室内剪切试验宜以三轴剪切试验为主。

3 “√”表示优先采用,“△”表示可采用。

4 采用复合地基处理时,对于有排水功能的措施可考虑固结引起的强度增长。

5.6.4 加固土桩复合地基的抗剪强度可按式 (5.6.4-1)、式 (5.6.4-

2) 计算确定:

$$c_{sp} = mc_p + (1-m)c_s \quad (5.6.4-1)$$

$$\varphi_{sp} = \varphi_s \quad (5.6.4-2)$$

式中 c_{sp} ——复合地基的黏聚力 (kPa);

φ_{sp} ——复合地基的内摩擦角 (°);

c_s ——桩间土天然抗剪黏聚力 (kPa);

φ_s ——桩间土天然抗剪内摩擦角 (°);

m ——复合地基置换率;

c_p ——桩体的抗剪强度 (kPa), 可取室内无侧限抗压强度的 0.2~0.3 倍。

5.6.5 稳定性验算应分别检算路堤施工期及铁路运营期的稳定系数,以运营期的稳定安全系数作为设计指标,施工期的稳定安全系数作为验算指标,路堤施工期荷载应考虑路堤自重和运架梁车等施工临时荷载;运营期荷载应包括路堤自重、列车和轨道荷载。地震力的计算应符合现行《铁路工程抗震设计规范》GB 50111 的有关规定。

5.6.6 路堤和地基的整体稳定性宜采用圆弧滑动法进行计算。稳定

系数 F_s 可按式（5.6.6-1）进行计算，计算模型如图 5.6.6 所示。

$$F_s = \frac{M_{RS} + M_{RP} + M_{RR}}{M_D} \quad (5.6.6-1)$$

$$M_D = P_T R \quad (5.6.6-2)$$

$$M_{RS} = (\sum S_i + \sum S_j) R \quad (5.6.6-3)$$

$$M_{RR} = T_g l_T \quad (5.6.6-4)$$

$$P_T = \sum W_i \sin \alpha_i + \sum W_j \sin \alpha_j \quad (5.6.6-5)$$

$$S_i = W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_{qi} + c_{qi} l_i \text{ 或 } S_i = \tau_i l_i \quad (5.6.6-6)$$

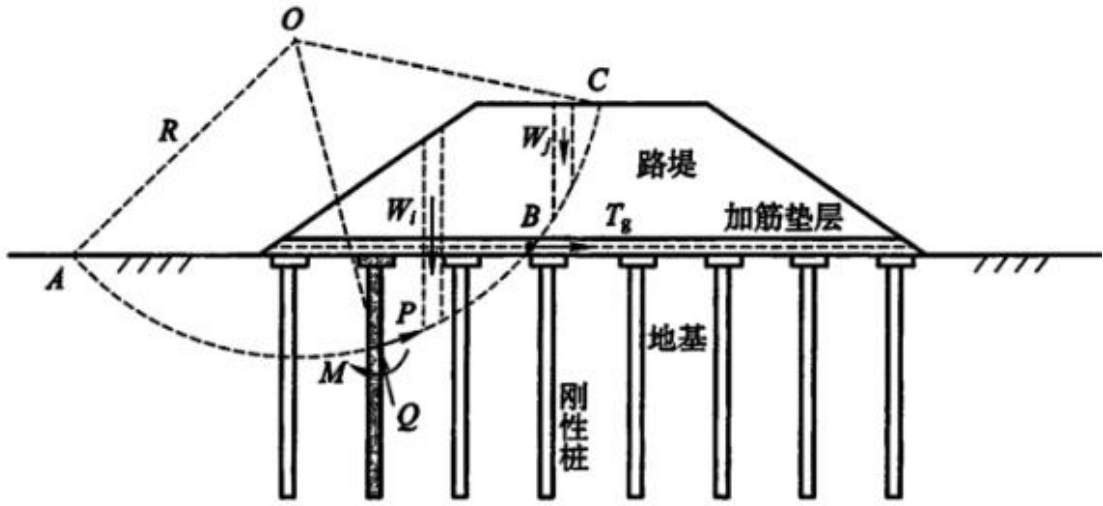


图 5.6.6 加固土桩复合地基的圆弧滑动法计算模型

式中 M_D ——滑动土条单位宽度下滑力矩($kN \cdot m/m$);

M_{RS} ——地基土内(AB)桩间土和路堤内(BC), 5 条单位, 宽度抗滑力矩之和($kN \cdot m/m$);

M_{RR} ——垫层筋带单位宽度抗滑力矩($kN \cdot m/m$);

M_{RP} ——单位宽度, 整体抗滑力矩, 具体应考虑桩体类型, 地基条件和结构布置等因素, 按桩体弯拉、弯压、倾斜、滑移、剪切和桩间土绕流等不同破坏模式确定($kN \cdot m/m$);

P_T ——各土条在滑弧切线方向的单位宽度下滑力总和(kN/m);

S_i ——地基土内 (AB) 第 i 土条单位宽度抗剪力(kN/m)，天然饱

和黏性土地及计算时 W_i 不计自重；

S_j ——路堤内 (BC) 第 i 土条单位宽度抗剪力(kN/m)；

T_g ——筋带容许拉力值(kN/m)，一般取极限值的 0.2~0.4 倍；

l_T ——筋带至滑动圆心竖向距离(m)；

W_i 、 W_j ——第 i 、 j 土条单位宽度重量(kN/m)；

α_i 、 α_j ——第 i 、 j 土条底滑面的倾角($^\circ$)；

c_{qi} 、 φ_{qi} ——当第 i 土条的滑裂面处于地基内 (AB) 时，分别为该土条所在土层的快剪黏聚力(kPa)及快剪内摩擦角($^\circ$)；

τ_i ——第 i 土条底滑面的不排水抗剪强度(kPa)。

5.6.7 路基稳定性计算分析得到的稳定系数不得小于表 5.6.7 所列值。

表 5.6.7 路堤最小稳定安全系数

列车设计行车速度 v (km / h)	最小稳定安全系数 $[F_a]$	
	施工期	运营期
$250 \leq v \leq 350$	1.15	1.25
$120 \leq v \leq 200$	1.10	1.25
$v \leq 120$	1.10	1.20

6 施 工

6.1 施工准备

6.1.1 施工准备阶段施工单位应具备下列资料：

- 1 工程地质详细勘察报告，其内容应包括场地的工程地质和环境资料，不良地质作用和地下障碍物的分布和发育情况；
- 2 施工场地和毗邻区域的上空、地下和地上管线、建筑物及障碍物分布等调查资料；
- 3 试桩资料；
- 4 水泥土配比及施工工艺试验资料；
- 5 加芯搅拌桩桩位设计布置图及技术要求；
- 6 主要施工机械及配套设备的技术性能资料；
- 7 施工组织设计；
- 8 水泥、砂、石、钢筋等原材料的质检报告，芯桩的出厂合格证及现场抽样检验资料；
- 9 成桩工艺试验资料

6.1.2 施工组织设计应根据设计要求、工程特点、工程地质和水文地质条件、施工工法编制，应包括下列内容：

- 1 施工平面布置图、桩位布置图；
- 2 根据场地工程地质条件，确定成孔机械、配套设备以及合理的施工工艺；
- 3 确定施工作业计划和劳动力组织计划；

4 确定机械设备、备件、工具、材料的供应计划；

5 施工质量管理措施、施工质量保证措施和施工安全措施。

6.1.3 施工前应对加芯搅拌桩施工机械及其配套设备进行试运行，对流量、压力、钻杆提升速度与钻杆旋转速度等施工参数进行标定。

6.1.4 平整场地并清除地上和地下障碍物，当表层土松软时应碾压夯实；场地平整后应测量场地平面标高，平整后的场地标高应高于加芯搅拌桩桩顶设计标高 0.5m 以上。

6.1.5 施工前应依据不同地质条件和设备组合选择有代表性的地段进行成桩工艺性试验(不少于 3 根)，并进行单桩承载力试验。在保证桩合格的前提下，确定主要工艺参数，并报监理单位确认。对未填充段空孔植入桩时应控制桩的对中定位、垂直度、溜桩掉桩，对两节桩施工时应考虑接桩稳定性，制定相关措施。

6.1.6 根据桩位设计布置图在现场布置桩位，桩位放线偏差不应大于 10mm，桩位确定后应填写放线记录，经有关单位验线后方可施工。

6.1.7 桩轴线的控制点和水准基点应设在不受施工影响之处，施工过程中应妥善保管并应经常复测；开工前桩位测量放样后，报监理人员复核验收并签字确认。

6.2 施工机械

6.2.1 加芯搅拌桩施工机械由水泥土搅拌桩机和压芯桩机械或灌注桩机等组成。应根据设计文件、岩土工程勘察报告、施工现场周边环境情况等，选用适宜的芯桩沉桩机械。有条件时也可选用专用组合

机（加芯搅拌桩机）进行作业

6.2.2 水泥土搅拌桩机采用单头或多头搅拌桩机，其配套装置为灰浆集料筒、注浆泵、空气压缩机、水泥浆拌合机、拌浆池等。

1 水泥土搅拌桩机应配置深度计量、升降速度调节和显示、垂直度指示和调整装置、转速及电流显示仪表等。

2 灰浆集料筒可采用立式搅拌桶，具有二级过滤性能，并在桶内设置反映灰浆体积的刻度或标尺。

3 注浆泵应采用可调式灰浆泵，并应配置流量、泵压等纪录装置。

6.2.3 压芯桩机械其设备自重及压桩力应和芯桩贯入阻力相匹配，并应配置垂直度调整和压桩力记录装置。

6.3 施工作业

6.3.1 加芯搅拌桩施工步骤为：

- 1 水泥土搅拌桩机就位、调平；
- 2 预搅下沉喷浆至设计加固深度；
- 3 按施工工艺下上重复喷浆、搅拌；
- 4 完成水泥土搅拌桩制作后，关闭搅拌机械并移位；
- 5 静力压芯桩或沉管灌注芯桩机械就位、调平；
- 6 静力压入预制混凝土芯桩或现场复打制作混凝土芯桩；
- 7 移位重复上述步骤进行下一根桩施工。

6.3.2 水泥土搅拌桩施工要点

水泥土搅拌桩施工及质量控制应遵照《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 水泥土搅拌法有关要求执行。根据混凝土芯水泥土搅拌桩特

点尚应作好以下要点：

1 施工前应确定灰浆泵输浆量，灰浆经输浆管到达搅拌机喷浆口的时间，宜用流量泵控制输浆速度，并应使搅拌提升速度与输浆速度匹配；

2 水泥浆宜在搅拌桩施工前一小时内搅拌，水泥浆应搅拌均匀，防止发生离析，宜用浆液比重计测定浆液配比及搅拌均匀程度，注入贮浆筒时应过滤。

3 搅拌桩下钻过程中钻杆转速应根据土质情况、水灰比、设备功率等条件通过成桩工艺试验确定，可取 10~25r/min，钻进困难时可注入少量水泥浆。

4 施工中应保持搅拌桩机底盘的水平和导向架的垂直，搅拌桩的垂直度偏差不应大于 1%；桩位允许偏差为 50mm；成桩直径和桩长不应小于设计值。

5 搅拌头翼片数量、宽度、与搅拌轴的垂直夹角、搅拌头的回转数、提升速度应相互匹配，以确保加固深度范围内土体的任何一点均能经过 20 次以上的搅拌。

6 宜采用下沉喷浆，喷浆速度、遍数应和注浆泵单位时间输送量相匹配，当采用二喷四搅时喷浆速度不宜超过 1.0m/min，否则应增加喷浆和喷浆次数，搅拌升降速度不宜大于 2m/min；工作电流不应大于测定值；停浆面应高出桩顶设计标高 300~500mm。在开挖基坑时，应将搅拌桩顶端施工质量较差的桩段用人工挖除。

7 芯桩底部至搅拌桩底应充分搅拌，必要时可增加喷浆量和搅拌

次数，搅拌桩底原位喷浆搅拌不少于 30 秒。

8 在提升喷浆过程中，根据成桩工艺试验，钻杆转速可提高，水泥土桩底部和桩顶个 3m 范围内应喷浆复搅一次。

9 提升至停浆面时停止喷浆，在喷浆管道内吹入高压空气清除管道余浆，并将钻头逐渐旋转提升出地面。

10 施工时应防止冒浆和同心钻(搅拌钻头和混合土同步旋转)，在塑性指数较高的粘土中施工时，宜增加搅拌次数。

11 施工中应做好施工纪录，重点是每根桩搅拌时间、水泥用量、水灰比、注浆泵压力、搅拌深度、钻杆提升速度、钻杆旋转速度、每延米喷浆量（喷浆遍数、时间）及搅拌次数等。

12 搅拌桩成桩后至芯桩成桩的时间间隔应根据成桩工艺试验确定。13 发现工程地质勘察报告未说明的新近杂填土、软弱土时，应及时通知有关部门处理。

6.3.3 预制混凝土芯桩制作

1 预制混凝土芯桩宜在工厂制作，施工现场有条件时也可在现场制作。场地应平整、坚实，不得产生不均匀沉降；底模应平整，并具有足够刚度。

2 芯桩主筋宜采用对焊或搭接焊，同一截面内接头数量不得超过总根数的 50%，两接头间距大于 1m。

3 芯桩钢筋骨架允许偏差见表 6.3.3-1：

表 6.3.3-1 芯桩钢筋骨架允许偏差

序号	项 目	允许偏差（mm）
1	主筋长度	± 15

2	主筋间距	± 5
3	箍筋间距或螺旋筋螺距	± 15
4	桩接头预埋件锚筋长度	± 10

混凝土石子粒径不宜大于 25mm。

4 预制芯桩单节长度不宜大于 10m。

5 单根芯桩混凝土必须连续浇注不得中断。同一配比的混凝土每班组留置不少于二组试块(每组 3 块),一组与芯桩同等条件下养护,用于判定芯桩起吊运输条件;一组进行标准养护,用于评定芯桩混凝土强度。

6 芯桩制作质量要求和偏差见表 6.3.3-2:

表 6.3.3-2 芯桩制作允许偏差

序 号	项 目	允许偏差 (mm)
1	横截面边长	± 5
2	桩顶、桩端对角线	5
3	保护层厚度	± 5
4	桩身弯曲矢高	不大于 1‰桩长, 且 ≤ 20
5	掉角深度	10
6	混凝土干缩裂缝深度	≤ 20

7 预制芯桩验收应在制作地点进行,检验前不得修补蜂窝、裂缝及其他缺陷。芯桩进场后应有专人进行复查,运输、吊装出现的裂缝不应大于 0.3mm,深度不得超过截面尺寸的 1/4,同一侧面裂缝数不得多于 2 条。

8 预制芯桩成品检验应做好纪录,包括编号、浇筑日期、试块强度、外观检查和质量评定。对于成批量生产的预制混凝土芯桩尚应出

具产品质量合格证。

6.3.4 预制混凝土芯桩的起吊宜按以下要求：

- 1 预制芯桩在吊装过程中应轻吊轻放，防止碰撞损伤；
- 2 预制芯桩不宜在施工现场多次倒运；
- 3 预制芯桩长度不大于 15m，且符合现行相应国家、行业、地方、企业标准规定的单节长度时，宜采用两点起吊；也可采用专用吊钩钩住预制空心两端内壁进行水平起吊，吊绳与桩夹角宜大于 45°。

6.3.5 预制芯桩运输宜采用平板车装卸，运输时应采取防止桩滑移与损伤的措施。

6.3.6 预制芯桩的现场堆放应符合下列规定：

- 1 堆放场地应平整坚实，排水条件良好；
- 2 堆放时支垫材料宜选用长方木或枕木，不应使用有棱角的金属构件；
- 3 应按不同规格、长度及施工流水顺序分类堆放；
- 4 堆叠的层数应满足地基承载力的要求。

6.3.7 施工现场移桩应符合下列规定：

- 1 预制桩叠层堆放时，应采用吊机取桩，不应拖拉移桩；
- 2 应保持桩机的稳定和桩的完整；
- 3 采用三点支撑履带自行式打桩机施工时不宜拖拉取桩。

6.3.8 预制混凝土芯桩植入一般规定

- 1 芯桩植入应根据现场场地条件、周边环境要求及施工工艺要求选用合适的沉桩方式，芯桩应在外包体初凝前植入，置入施工时间宜

控制在 2 小时内。对于钻孔灌注复合桩若因特殊情况芯桩植入时间需延长，应在混凝土中添加缓凝剂，植入时间不得超过 5 小时。

2 桩位控制：沉桩前桩位应做好标记，严格控制芯桩对中精度，对准桩位允许偏差± 20mm，沉桩 0.5m~1.0m 时垂直度偏差不应大于 0.5%。

3 短芯防沉措施：在施工前可安装导向架或定位架，确保短芯桩在插入时保持垂直并且位置准确，使其在插入过程中不会偏移或倾斜；必要时，可以在芯桩的顶部或底部设置锚定装置，如锚杆或锚板，以固定芯桩的位置；芯桩插入到位后，对桩顶进行适当的处理，如设置桩帽或承台，以分散荷载并保护桩顶不受损害；

4 接桩：入土桩节的桩头高出地面 0.5m~1.0m 时进行接桩，接桩方式有焊接连接和机械连接两种；

5 送桩：送桩器应有足够的强度和刚度，送桩器长度应满足送桩深度的要求；送桩前，桩露出地面高度宜为 0.3m~0.5m；沉桩控制深度应根据地质条件、贯入度、压桩力、设计桩长、标高等因素综合确定。水泥土复合桩按桩长控制为主，压桩力或贯入度控制为辅；钻孔灌注复合桩以压桩力或贯入度控制为主，桩长控制为辅；

6 桩端标高宜等于或低于成孔有效标高。

6.3.9 钻孔灌注复合桩施工外包体时，除应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的相关规定外，还应符合下列要求：

1 成孔直径应不小于设计图纸规定的直径；

2 成孔需考虑护壁措施，成孔完成后应及时下放导管；

3 导管安放完毕后，应进行清孔作业，做到边循环边测定孔底沉渣厚度，当孔底沉渣厚度符合设计及规范要求时，应立即进行水下混凝土的灌注工作；

4 植入预制芯桩时间，应控制在混凝土初凝前，且在浇筑混凝土完成 2 小时内。

6.3.10 钻孔灌注复合桩施工外包体时，填充料灌注时应满足以下要求：

1 填充料应根据设计要求选择，应根据施工设备和施工组织，添加缓凝剂以满足植入桩时间需要细石混凝土坍落度宜控制在 180mm~220mm；

2 浇筑前，计算超灌量时应扣除芯桩体积，充盈系数不宜小于 1.2，计算充盈系数时扣除芯桩体积，最终充盈系数宜由试桩确定；

3 灌注落差大于 3m 时，应采用导管灌注，孔内经检查沉渣满足规范要求时，导管需伸至孔底，灌注填充料时缓慢提管；

4 预钻孔内有水或采用泥浆护壁，应采用水下灌注混凝土施工工艺；

5 水下混凝土浇筑时，施工中要保证灌入量，浇筑时导管理深控制在 2m~6m，拆管前专人测量孔内混凝土面，并做记录；

6 灌浆结束后应及时植桩，应在混凝土初凝前植入预制芯桩；

7 当桩顶设置有护筒时，应在填充料浇筑结束后，芯桩植入之前拆除护筒。

6.3.11 遇下列特殊情况之一时，应暂停沉桩，研究处理后方可继续

施工：

- 1 压桩力或沉桩贯入度突变、压桩力不到位或总锤击数超过规定值、沉桩过程出现异常声响、桩身突然倾斜；
- 2 沉桩入土深度与设计要求差异大、实际沉桩情况与地质报告中的土层性质明显不符；
- 3 桩头混凝土剥落、破碎，或桩身混凝土出现裂缝或破碎；
- 4 地面明显隆起、邻桩上浮或位移过大。

6.3.12 静压法沉桩应符合以下规定：

1 静压沉桩应根据地质条件、预制桩型号、入土深度等因素，选用顶压式沉桩工法或抱压式沉桩工法。

2 压桩机型号和配重可根据设计要求和勘察报告或根据试桩资料等因素选择，在没有规定要求和现有资料的情况下，可根据相关规范选择压桩机类型。

3 静压法沉桩场地应满足压桩机接地压力的要求，当不能满足时，应采取有效措施保证压桩机的稳定。

4 压桩过程中应记录沉桩过程的各种情况，包括压桩时间、桩位编号、桩身质量、入土深度和对应的压力读数。

5 沉桩时应符合下列要求：

- a) 首节桩插入时，垂直度偏差不应大于 0.5%；
- b) 压桩时压桩机应保持水平；抱压力不应大于桩身允许侧向压力的 1.1 倍；
- c) 沉桩宜连续一次性将桩沉到设计标高，尽量缩短中间停顿时

间，应避免在接近持力层时接桩。

6 静压法施工过程应根据现场试桩静载检测的试验结果，确定终压标准，预设终压标准可取单桩承载力特征值 1.4~1.6 倍，并宜压至设计标高。

6.3.13 锤击法沉桩应符合以下规定：

1 桩机的选择应满足沉桩施工的技术要求，并具有足够的强度、刚度和稳定性。

2 锤型、锤重的选择可根据设计要求、工程地质条件、施工条件、预制芯桩类型、入土深度等因素确定，或根据试桩资料确定。

3 桩帽及锤垫、桩垫的选择应符合下列要求：

a) 桩帽应与板桩截面相匹配，具有足够的刚度、强度和耐打性，且桩帽或送桩帽与桩周围的间隙应为 5mm~10mm；

b) 桩帽的上部与桩锤之间，需设置锤垫，厚度宜为 150mm~200mm，打桩前应进行检查、校正或更换；

c) 桩帽套筒底面与桩头之间应设置弹性桩垫，其压实厚度不应小于 120mm，且应在打桩期间经常检查，及时更换。

4 锤击法施工应符合下列要求：

a) 施工应设置机械臂导向架，并及时调整机座和桩架，使桩锤上下运动轨迹与桩身横截面形心线重合；

b) 锤击沉桩应严格控制每次锤击沉桩的入土深度，不宜大于 300mm~500mm，并且应连续作业，减少中间停锤时间，宜避免桩端在硬土或密砂夹层中停留时间过长；

c) 宜采用重锤低击施工工艺,控制锤击数,防止桩身疲劳破坏;

d) 锤击施工应根据现场环境要求采取防挤土和噪声措施,可选择新型液压锤沉桩。

5 锤击法施工过程的质量控制应符合下列要求:

a) 施工时最大锤击压应力和锤击拉应力均不应大于混凝土的轴心抗压强度设计值和轴心抗拉强度设计值;

b) 收锤标准应根据地质条件、单桩承载力、锤重、桩的规格和长度、进入持力层的要求确定,单桩的总锤击数不宜超过1000击,最后1.0m的锤击数不宜超过150击;当以贯入度控制时,最后贯入度不宜小于30mm/10击,持力层为较薄的强风化覆盖层,且上覆土层较软弱时,最后贯入度可适当减小,但不宜小于25mm/10击。

6.3.14 预制芯桩的焊接接桩应符合下列规定:

1 桩头宜高出地面0.5m~1.0m;

2 下节桩的桩头处宜设置导向箍或其他导向措施。接桩时,上、下节桩段应保持顺直,错位不超过2mm,节点弯曲矢高不应大于1/1000桩长,且不应大于20mm;

3 上、下节桩接头端板接口应洁净、干燥,且焊接处应刷至露出金属光泽;

4 手工焊接时宜先在坡口四周上对称点焊4点~6点,待上、下节桩固定后拆除导向箍再分层焊接,焊接宜对称进行;焊缝自然冷却

时间锤击桩不小于 8 分钟，静压桩不小于 6 分钟，采用二氧化碳气体保护焊时不少于 3 分钟；

5 焊接层数不应少于 2 层，内层焊渣应清理干净后方能施焊外层，焊缝应饱满连续；

6 手工电弧堆焊时，第一层宜用 $\Phi 3.2\text{mm}$ 电焊条堆焊，保证根部焊透。第二层可用粗焊条，宜采用 E43 型系列焊条；采用二氧化碳气体保护焊时，焊丝宜采用 ER50-6 型；

7 桩接头焊好后应进行外观检查，检查合格后，方可继续沉桩，不应浇水冷却；

8 钢桩尖或者混凝土桩尖宜在工厂内焊接；当在工地焊接时，宜在堆放现场焊接。不应桩起吊后点焊、仰焊做法；

9 桩身接头焊缝外露部分应满足设计防腐要求；

10 雨天焊接时，应采取防雨措施。

6.3.15 预制芯桩采用机械连接方式时，应符合相应机械连接方式的规定，并应符合下列要求：

1 采用机械螺纹接头接桩时，应符合下列规定。

a)接桩前检查桩两端制作的尺寸偏差及连接件，无损伤后方可

起吊施工，下节桩段的桩头宜高出地面 0.5m~1.0m；

b)接桩时，卸下上、下节桩两端的保护装置后，应清理接头残留物涂抹润滑脂；

c)采用专用接头锥度对中，对准上下节桩后，旋紧连接；

d)可采用专用锥条式扳手旋紧，锁紧后两端板尚应有

1mm~2mm 的间隙。

2 采用机械啮合接头接桩时，应符合下列规定。

- a)连接前，连接处的桩端板应先清理干净，把满涂沥青涂料的连接销用扳手逐根旋入管桩带孔端板的螺栓孔内，并用钢模型板检测调整连接销的位置；
- b)剔除下边已就位管桩带槽端板连接槽内填塞的泡塑保护块，在连接槽内注入不少于一半槽深的沥青涂料，并沿带槽端板外周边抹上宽度 20mm、厚度 3mm 的沥青涂料。
当管桩基础的地基土、地下水为中等以上腐蚀介质时，带槽端板面应满涂沥青涂料，厚度不应小于 2mm；
- c) 将上节管桩吊起，使连接销与带槽端板上的各个连接口对准，随即将连接销插入连接槽内；
- d) 加压使上、下桩节的桩端端头板接触，接桩完成。

3 采用其它机械方式接桩时，应符合相应机械连接方式操作要求的规定，固定正确牢固。

6.3.16 预制芯桩截桩应采用专用锯桩器，不应采用大锤横向敲击截桩或强行扳拉截桩。

6.3.17 加芯搅拌桩施工过程应按本指南附录 A 做好记录。

6.3.18 加芯搅拌桩施工常见问题及处理措施见本指南附录 B。

6.4 施工安全

6.4.1 操作人员应经过安全教育后进场，施工过程中应定期召开安全工作会议及开展现场安全检查工作。

- 6.4.2 根据具体的施工条件和工地环境，制定专项施工方案，并明确各个施工环节的安全要求和注意事项。
- 6.4.3 在施工现场进行必要的安全标识，包括警示标志、安全标志等，提醒工人注意安全。
- 6.4.4 施工前应对注浆泵、空气压缩机等设备和供水、供气、供浆管路系统、电路系统进行安全检查。
- 6.4.5 工程施工中，做好机械操作安全、用电用水安全、运输安全和防火安全等工作。
- 6.4.6 凡进入施工现场人员，必须戴安全帽，登高作业必须系好安全带。
- 6.4.7 为了监督施工现场的安全工作，需要安排专职安全管理人员，并配备必要的安全设施和器材。
- 6.4.8 施工现场应设置排水系统，排水沟的废水应经沉淀过滤达到标准后，方可排入市政排水管网。运送泥浆和废弃物时应用封闭的罐装车。
- 6.4.9 施工完成后应在桩位处设置防护措施。
- 6.4.10 针对施工现场的设备噪音、返浆等常见影响环境的因素，施工单位应建立现场环境检查制度，严格控制噪声，并应符合现行国家标准《建筑施工场界环境噪声排放标准》GB 12523 的规定。

7 质量检验与工程验收

7.1 质量检验

7.1.1 加芯搅拌桩质量检验与工程验收主要依据《建筑桩基技术规范》JGJ94 及《铁路工程桩基检测技术规程》TB10218。

7.1.2 加芯搅拌桩质量检验按时间顺序可分为三个阶段：施工前检验、施工中检验和施工后检验。

7.1.3 加芯搅拌桩质量检验主控项目应包括水泥及外掺剂质量、水泥用量、装束、桩位偏差、桩身完整性和单桩承载力等。

7.2 施工前检验

7.2.1 施工前应对砂、石子、水泥、钢材等桩体原材料进行产品质量检验。

7.2.2 施工前应对水泥土室内试验结果进行检验。

7.2.3 施工前应对施工机械设备性能进行检验。

7.2.4 施工前应对桩位放样偏差进行检验。

7.2.5 植入法采用的芯桩质量检查和检测宜按单位工程进行抽检，采用不同成孔植入法施工时，应将单位工程划分为若干个检验批，并按检验批进行抽检。

7.2.6 预制桩芯的检查应符合下列规定：

1 应按照设计图纸要求，根据产品合格证、运货单及预制桩外壁的标志，对预制桩的规格和型号进行逐节检查。当施工工艺对龄期有要求时，应核查龄期，预制桩的龄期应满足施工工艺要求

2 应对预制桩的尺寸偏差和外观质量进行抽检。抽查数量不应少于预制桩桩节总数的 2%且不少于 6 根，预制桩的尺寸偏差和外观质量应符合现行国家标准的相关规定。同一检验批中，当抽检结果出现一节预制桩不符合质量要求时，应加倍检查，若再发现不合格的预制桩，该检验批的预制桩不准使用；

3 应对预制桩端板几何尺寸进行抽检。抽查数量不应少于预制桩桩节总数的 2%且不少于 6 块，检测结果应符合现行国家标准的相关规定，不应使用端板厚度或电焊坡口尺寸不合格的桩；

4 应对预制桩的主筋或预应力钢筋数量和直径、螺旋筋或箍筋直径和间距、螺旋筋或箍筋加密区的长度、以及钢筋混凝土保护层厚度进行抽检。每个检验批抽检桩节数不应少于 2 根，检测结果应符合设计要求或现行国家标准的相关规定。同一检验批中，当发现不合格的预制桩，该检验批的预制桩不准使用。

7.2.7 具体施工前质量检验标准见附录 C 表 C-1 中规定。

7.3 施工中检验

7.3.1 加芯搅拌桩施工中质量检验主要包括水泥土搅拌桩成桩、预制芯桩制作及静力压芯，或现场沉管灌注芯桩施工等工序过程的质量检验。

1 水泥土搅拌桩质量检验重点为：桩位放样偏差、水灰比、水泥用量、桩长、浆液压力、气压、搅拌头转速和机头升降速率、复搅次数和深度、喷浆时间、停浆处理方法、桩顶及桩底标高、垂直度等施

工参数及程序。

2 预制混凝土芯桩的静力压桩质量检验重点为：桩位、桩径、桩长、桩身垂直度、桩底及桩顶标高、接桩质量、压桩力及终压力或锤击贯入度。

3 现场灌注混凝土芯桩质量检验的重点为：桩位、沉管垂直度、混凝土灌注质量、充盈系数、沉芯深度、桩顶标高等。

7.3.2 对于成桩工艺性试验应采取浅部开挖检查方法，主要检查水泥土固结体形态大小、垂直度、桩身均匀程度及胶结情况。

7.3.3 对于重要工程或因土质复杂造成水泥土桩成桩质量可靠性较低的工程，成桩工艺性试验除按本指南 7.3.2 条执行外还应采用钻孔取芯方法进行质量检查，检测数量不宜少于总桩数的 1%，且不宜少于 3 根。

7.3.4 在施工过程中，施工单位应按附录 C 表 C-2 规定对每根桩进行质量检验，对不符合预定质量参数的桩应经监理单位确认后予以报废处理。

7.3.5 施工过程中，应监测施工对周围环境的影响，监测应符合下列要求：

- 1 应根据施工组织方案检查工程桩的施工顺序；
- 2 当施工钻孔、振动或挤土可能危及周边的建筑物、道路、市政设施时，应对周边建(构)筑物的变形和裂缝情况进行监测。

7.3.6 施工过程中应随时检查施工记录，并对照规定的施工工艺对每根桩进行质量评定；对不合格桩应根据具体情况采取补强或补桩等

措施。施工记录按下列规定进行审核：

1 当配置施工自动记录仪时，应检查自动记录仪是否正常，对所记录的各种施工数据进行逻辑分析判断；

2 当采用人工记录时，应检查作业班组是否安排专人记录，记录内容是否齐全、真实、清楚；

3 工程桩施工完成后，施工记录应经旁站监理人员签名确认。

7.4 施工后检验

7.4.1 基槽开挖后应检查加芯搅拌桩的桩位、桩径、桩数、芯桩偏差、桩顶标高及槽底土质情况。如不符合设计要求，应采取有效补救措施。

7.4.2 水泥土搅拌桩的均匀性、无侧限抗压强度检验应符合以下规定：

1 成桩后 3d 内，用轻型动力触探(N_{10})检查每米桩身的均匀性。检验数量为施工总桩数 1%，且不少于 3 根。

2 成桩 7d 后，采用浅部开挖桩头（深度宜超过停浆面下 0.5m）目测检查搅拌的外形和均匀性、测量成桩直径。检查数量为总桩数 2%，且不少于 3 根。

3 成桩 28 天后，应采用双管单动取样器在桩径方向 1/4 处、桩长范围内垂直钻孔取芯，观察桩体完整性、均匀性，取不同深度的不少于 3 个试样作无侧限抗压强度试验。

7.4.3 对相邻桩搭接要求严格的工程，应在成桩 15d 后，选取数根桩进行开挖，检查搭接情况。

7.4.4 施工完成后的工程桩应进行芯桩身完整性检验和承载力检验，宜在桩顶设计标高位置进行。

7.4.5 加芯搅拌桩质量检验应符合本指南附录 C 的表 C-3 规定。

7.5 完整性检验

7.5.1 加芯搅拌桩桩身完整性检验可通过低应变反射波法进行，用于检验混凝土桩桩身缺陷位置、范围和程度。

7.5.2 低应变反射波法适用于桩基桩径小于 2.0m，桩长不大于 40m 的加芯搅拌桩，可用于检验混凝土桩桩身缺陷位置、范围和程度。

7.5.3 桩身完整性检验评定应提出每根受验桩的桩身完整性类别。桩身完整性分类根据《铁路工程桩基检测技术规程》TB10218 中的分类，低应变反射法和钻芯法完整性评价均分为 I-IV 类，有对应的分类原则，见附录 C 的表 C-4。I、II 类为合格桩，III 类桩需由工程建设方与设计方等单位研究，以确定处理方案或继续使用，IV 类桩为不合格桩。

7.5.4 芯桩桩身完整性检验宜采用小应变法，抽检数量不应小于总桩数的 30%，且不应少于 20 根，每个承台下抽检的桩数不应少于 1 根，单桩和两桩承台下的桩应全数检验。

7.5.5 水泥土复合桩检验数量不少于 0.5%，且不应少于 6 根，当水泥土钻芯检验结果不满足要求时，宜增加工程桩静载检验数量，增加比例不小于 10%，且不少于 1 根。

7.5.6 各项质量检验的内容完整，记录准确，专人保管，进行必要的系统整理，作为竣工报告的附件备查。

7.6 承载力检验

7.6.1 加芯搅拌桩复合地基必须采用复合地基载荷试验和单桩载荷试验予以确定，载荷试验应在桩身条件满足试验荷载条件时，并宜在成桩 28d 后进行。

1 应先依据初步设计进行桩的竖向承载力试验，试桩数量在同一条件下不应少于 3 点（根），且不宜少于预估总桩数的 1%。根据试桩结果调整后，按施工图设计施工工程桩。

2 地基竣工验收时，施工完成后的工程桩，应进行竖向承载力检验。检验数量不得少于同条件下总桩数 1%，且不少于 3 点（根）。

3 设计为复合地基时，其中多桩复合地基载荷试验不宜少于总试验点（根）数的 1/3。当桩间表层土松软设计不考虑桩间土受力时，也可仅进行单桩载荷试验。

7.6.2 单桩或多桩复合地基载荷试验，根据加芯搅拌桩应用于软弱土地基特点补充以下要点：

1 单桩载荷试验应设置混凝土桩帽，复合地基载荷试验应设置混凝土刚性承压板及褥垫层，承压板面积应符合设计面积置换率要求。

2 加荷等级不应小于 8 级，进入极限承载力阶段每级加载量宜为 20~50kN。

3 复合地基承载力特征值的确定：

当压力—沉降曲线上极限荷载能确定，而其值不小于对应比例界限的 2 倍时，可取比例界限；当其值小于对应比例界限 2 倍时，可取极限荷载的一半。

4 当桩顶含芯率较低、芯桩长度比较小时,试验后宜进行浅部开挖检查芯桩周围及桩身上段有否裂缝,以判定桩的破坏原因。

5 单桩竖向静载荷试验除判定各试桩的单桩极限承载力外,还应删去失真的试桩,结合工程及地质具体情况确定极限承载力。复合地基载荷试验应说明承压板面积、面积置换率及对应的复合地基承载力特征值。

7.7 工程验收

7.7.1 加芯搅拌桩桩基工程及复合地基验收应在基坑开挖后,由建设单位组织施工、监理、设计等部门共同进行,加芯搅拌桩质量及承载力满足设计要求后,尚应对桩位、组合桩径、桩顶标高等进行检查,验收合格后方可进行褥垫层和基础施工。

7.7.2 加芯搅拌桩工程验收应包括下列资料:

- 1 工程地质勘察报告、桩位设计施工图、图纸会审纪要、设计变更、材料检验报告等;
- 2 经审定的施工组织设计或施工方案、水泥土配比设计及检测报告;
- 3 桩位测量放线图及工程桩位复验签证;
- 4 预制芯桩验收及质量合格证;
- 5 桩施工质量检验资料及芯桩完整性检测报告;
- 6 单桩及复合地基载荷试验报告、工程桩复验报告;
- 7 竣工图和竣工报告。

附录 A 加芯搅拌桩施工记录表

施工单位:

总包单位:

桩号:

桩型及规格		设计承载力特征值 (kN)		配桩			
钻孔深度		实际钻孔深度		自然地面标高			
钻孔直径		扩孔部分直径		扩孔部分高度			
搅拌桩设计参数							
	设计桩长	桩径/边长	桩顶标高	桩底标高	备注		
水泥土桩							
芯桩							
施工过程记录							
施工顺序	水泥土桩						
	时间		下沉/提升起始标高 (m)	浆液压力 (MPa)	钻杆旋转速度 (r/min)	钻杆下沉/提升速度 (cm/min)	水泥用量 (kg)
	开始	结束					
下沉							
提升							
下沉							
提升							
备注							
	时间		桩长 (m)	桩顶标高 (m)	送桩深度 (m)	接桩时间 (min)	终压力 (kN)
施工顺序	开始	结束					
下沉							
提升							
下沉							
提升							
备注							

质量检查员:

日期:

附录 B 施工中常见问题及处理

表 B-1 施工中常见问题及处理

常见问题	发生原因	处理措施
预搅下沉困难、电流值高、电机跳闸	1.电压偏低; 2.土质坚硬,阻力太大; 3.遇大块骨料等障碍物。	1.调高电压; 2.适量冲水下沉;更换合适的钻具; 3.开挖排除障碍。
搅拌头下不到预定深度,但电流不高	土质太粘,搅拌机自重不够。	增加搅拌机自重或设反压装置。
集料斗浆液过早排空或剩余过多	1.输浆泵输浆量不准; 2.输浆管堵塞、漏浆; 3.喷浆升降速度不准; 4.后台投料不准、加水量少或过多。	1.重新标定输浆量; 2.检修输头泵及管路; 3.调整喷浆升降速度; 4.重新标定投料量及加水量。
输浆管堵塞、爆裂	1.输浆管内有水泥硬块; 2.喷浆口间隙太小。	1.拆洗输浆管; 2.增加水泥浆过滤遍数或更换过滤网; 3.调整喷浆口径。
冒 浆	1.土质太软,搅拌不动; 2.遇硬土或障碍下沉困难; 3.泵输浆量大; 4.喷浆升降速度小; 5.水灰比过大。	1.加强搅拌; 2.清除障碍物; 3.调整输浆泵流量; 4.加大升降速度及注浆遍数; 5.减小水灰比。
同心钻	1.土质太软、抱钻; 2.复盖土压力小; 3.搅拌叶片角度不适宜。	1.加砂搅拌; 2.较少开挖; 3.调整叶片角度或更换钻头; 4.钻头加水润湿。
沉桩困难,达不到设计标高	1.间隔时间过长; 2.接桩时间过长; 3.水灰比或注浆量少; 4.压桩力不足; 5.桩身偏斜,压入土中; 6.水泥土搅拌不均匀。	1.减少间隔时间或压桩前复搅; 2.缩短接桩时间; 3.调整水灰比或注水搅拌; 4.加大压桩力或激振力; 5.确保芯桩位置及垂直度; 6.增加搅拌次数。

附录 C 施工质量检验标准

表 C-1 施工前质量检验标准

项目	序号	检查项目	允许偏差或允许值	检查方法
主控项目	1	水泥及外加剂质量	符合出厂及设计要求	查产品合格证和抽样送检
	2	桩位偏差 (mm)	≤ 10	
一般项目	1	施工机械设备性能	符合出厂及设计要求	查设备标定记录
	2	芯桩外观质量	表面平整、密实 预应力芯桩不得出现纵向裂缝，非预应力芯桩混凝土收缩裂缝深度 $\leq 20\text{mm}$ 宽度 $\leq 0.15\text{mm}$ 无露筋 局部磕损：深 $\leq 5\text{mm}$ ，对方桩掉角深度 $\leq 10\text{mm}$	直观用钢尺量
	3	芯桩桩径（边长）(mm)	± 5	用钢尺量
	4	管壁厚度(mm)	正偏差不限 0	用钢尺量
	5	芯桩桩长(M)	$\pm 0.5\%l_c$	用钢尺量
	6	桩尖中心线 (mm)	< 10	用钢尺量
	7	桩顶对桩中心线垂直度偏差 (mm)	< 1	用直角靠尺量
	8	桩体弯曲	$< 1/1000l_c$ 且 $\leq 20\text{mm}$	用钢尺量
	9	接桩用材料	符合出厂及设计要求	查产品合格证或抽样送检

表 C-2 施工中质量检验标准

项目	序号	检查项目	允许偏差或允许值	检查方法
主控项目	1	水泥及外加剂用量	按设计要求	查施工纪录
一般项目	1	浆液压力	按施工组织设计要求	查施工纪录
	2	气压	按施工组织设计要求	查施工纪录
	3	水灰比	按施工组织设计要求	查施工纪录
	4	钻杆提升速度	按施工组织设计要求	查施工纪录
	5	钻杆旋转速度	按施工组织设计要求	查施工纪录
	6	水泥土桩垂直度(%)	1	经纬仪
	7	水泥土桩底标高	按设计要求	测量钻头深度
	8	管桩垂直度(%)	0.5	经纬仪
	9	管桩桩顶标高(mm)	±50	水准仪
	10	接桩质量	按设计或规范要求	满足设计或规范要求
	11	接桩停歇时间(min)	>5	秒表测定
	12	接桩上下节平面偏差(mm)	10	用钢尺量
	13	接桩节点弯曲矢高(mm)	1/1000l	用钢尺量

表 C-3 施工后质量检验标准

项 目	序 号	检查项目	允许偏差或允许 值	检查方法
主控项目	1	承载力	按设计要求	按本指南
	2	芯桩中心偏差(mm)	按现行行业标准 《建筑桩基技术 规范》JGJ94 打 入桩桩位允许偏 差执行	全站仪及钢尺 量
	3	芯桩桩身完整性	不应出现Ⅲ类桩	低应变法
	4	桩数	按设计要求	现场清点
一般项目	1	加芯搅拌桩桩径	按设计要求	用钢尺量
	2	桩顶标高(mm)	±50	水准仪

表 C-4 低应变反射法桩身完整性分类表

时域信号特征	幅频信号特征	完整性类别
$2L/c$ 时刻前无缺陷反射波，有桩底反射波	桩底谐振峰排列基本等间距，其相邻频差 $\Delta f = \frac{c}{2L}$	I
$2L/c$ 时刻前出现轻微缺陷反射波，有桩底反射波	桩底谐振峰排列基本等间距，轻微缺陷产生的谐振峰之间的频差 $\Delta f' > \frac{c}{2L}$	II
$2L/c$ 时刻前有明显缺陷反射波	缺陷谐振峰排列基本等间距，相邻频差 $\Delta f' > \frac{c}{2L}$	III

时域信号特征	幅频信号特征	完整性类别
$2L/c$ 时刻前出现严重缺陷反射波，无桩底反射波； 或因桩身浅部严重缺陷使波形呈现低频大振幅衰减振动，无桩底反射波； 或按平均波速计算的桩长明显短于设计桩长	缺陷谐振峰排列基本等间距，相邻频差 $\Delta f' > \frac{c}{2L}$，无桩底谐振峰； 或因桩身浅部严重缺陷只出现单一谐振峰，无桩底谐振峰	IV

附录 D 室内水泥土抗压强度试验要点

D.0.1 试验目的：测定水泥土立方体的抗压强度，以确定和校核水泥土配合比，为水泥土搅拌桩设计和施工提供参数。

D.0.2 材料选用：

1 土料：应是工程现场所要加固的土。土样从现场采取运至实验室，进行风干、碾碎和过孔径 5mm 筛子备用；

2 水泥：应是工程现场拟使用的水泥。水泥不应超过出厂期三个月。试验前应重新测定水泥标号，当满足出厂标号时才可使用；

3 水：采用一般的自来水。

D.0.3 试件制备：

1 试模：采用 70.7mm×70.7mm×70.7mm 立方体试模，试模应具有足够的刚度并便于拆装。试模内表面应光滑、平整、相邻面应保持

垂直。

2 试件配方：水泥掺入量可按下式确定：

$$m_c = \frac{1+w_1}{1+w_0} \alpha_H m_0 \quad (\text{D.0.3—1})$$

$$m_H = \left(\frac{w_1 w_0}{1+w_1} + \mu \alpha_H \right) \frac{1+w_1}{1+w_0} m_0 \quad (\text{D.0.3—2})$$

式中： m_0 ——风干土重量；

m_c ——水泥重量；

m_H ——水重量；

w_1 ——土的天然含水量(%)；

w_0 ——风干土的含水量(%)；

α_H ——水泥掺入比；

μ ——水灰比。

3 捣实方法：试件可在振动台上捣实。振动台频率应为 3000 ± 200 次/分钟，空载振幅应为 $0.5 \pm 0.1 \text{mm}$ ，负载振幅应为 $0.35 \pm 0.05 \text{mm}$ 。在没有振动台条件时，也可采用人工捣实。捣棒应采用钢质材料制成，直径 10mm ，长度 350mm ，一端应为圆头形。

D.0.4 试件制作成型和养护：

1 在制作试件前，将试模组装牢固并清刷干净，在内壁涂一层脱模剂。

2 测试风干土的含水量，并根据配比分别称量风干土、水泥和水。

3 将风干土和水泥放在搅拌锅内用搅拌铲人工拌和均匀。然后将水一次性地或分次地喷洒在水泥土上，进行拌合直至均匀。

4 采用振动台成型时,可先在试模内装入一半水泥土拌和料在振动台上振动 1 分钟,再装入其余水泥土料,并稍有富余,在振动台上振动 1 分钟。振动时应防止试模在振动台上跳动。采用人工插捣成型时,水泥土拌和料应分为两层装入试模。每层装料厚度应大致相等。每层插捣时按顺时针方向从边缘向中心均匀进行,同时将试模进行左右前后摇动,直至面上没有气泡出现为止。插捣时捣棒必须保持垂直,不得倾斜,并用抹刀沿试模内壁插入数下,防止产生麻面。捣棒应每层插捣 25 次。插捣底层时,捣棒应达到试模底面,插捣上层时,捣棒应插入下层约 1cm。

5 振捣或插捣完毕后,刮除试模顶部多余的水泥土,并抹平表面,盖上塑料布防止水分蒸发,并编号放入标准养护室。

6 试件成型后,根据水泥土的强度决定拆模时间,一般 3 天后可拆模,拆模后称量每一试块重量,然后将试块浸入水中标准养护或将试块放在湿度不小于 90%的养护室内养护,养护室温度应控制在 $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 内。

D.0.5 试验:

1 压力设备:采用的压力试验机,其示值的相对误差不应大于 2%,量程应能使试件的预估破坏荷载不小于全量程的 20%,也不大于全量程的 80%。

2 试验步骤:

1) 试件从养护室取出后,应将试件表面擦干称其重量并及时进行试验;

2) 把试件放在试验机下压板的中心。试件的承压面应与成型时的顶面垂直。开动试验机，当上压板与试件接近时，调整球座，使其接触均匀；

3) 以 10~15N/s 的速度连续而均匀地加荷。当试件接近破坏开始迅速变形时，应停止调整试验机油门，直至试件破坏，并记录破坏荷载。

D.0.6 试验结果计算：

1 混凝土抗压强度按下式计算：

$$f_{cu} = P / A \quad (D.0.6)$$

式中： f_{cu} ——试验龄期时混凝土抗压强度(MPa)；

P ——破坏荷载(N)；

A ——试件的承压面积(mm²)。

2 取 3 个试件测试值的算术平均值作为该组试件的抗压强度值。当单个试件的测试值与平均值之差超过平均值+15%时，该试件测试值应予以剔除，按余下两个试件的测试值计算平均值。剔除后如一组试件不足两个，则该组试验结果无效，需重做。

本指南用词说明

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：

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”；表示允许稍有选择，在条件许可时首先这样做的：

3) 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、规范执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

本指南引用标准名录

- 1 复合地基技术规范 GB/T 50783
- 2 建筑地基基础设计规范 GB 50007
- 3 建筑地基处理技术规范 JGJ79
- 4 建筑地基基础工程施工规范 GB 51004
- 5 建筑与市政地基基础通用规范 GB 55003
- 6 铁路桥涵地基和基础设计规范 TB 10093
- 7 铁路路基设计规范 TB 10001
- 8 铁路特殊路基设计规范 TB 10035
- 9 铁路工程桩基检测技术规程 TB 10218
- 10 铁路工程地基处理技术规程 TB 10106
- 11 铁路路基工程施工质量验收标准 TB 10414
- 12 天津市劲性搅拌桩技术规程 DB/T29-102
- 13 预制芯桩复合桩技术规程 DB42/T 2221
- 14 加芯搅拌桩技术规程 DBJ53T-19