

铁路工程加芯水泥土搅拌桩复合地基 技术指南

Technical guidelines for composite foundation
of concrete core mixing pile in railway engineering

2025 年 11 月 30 日 发布

2025 年 11 月 30 日 实施

广东省交通运输厅 发布

目 次

前 言..... III

引 言..... V

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 总则..... 2

5 设 计..... 2

 5.1 一般原则..... 2

 5.2 选型与布置..... 3

 5.3 构造要求..... 4

 5.4 承载力计算..... 4

 5.5 变形计算..... 8

 5.6 稳定性验算..... 11

6 施 工..... 14

 6.1 芯桩预制..... 14

 6.2 水泥土搅拌桩..... 15

 6.3 芯桩植入..... 16

 6.4 桩帽连接..... 17

 6.5 施工安全..... 17

7 验收..... 17

 7.1 一般规定..... 17

 7.2 主控项目..... 18

 7.3 一般项目..... 19

前 言

本文件按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广东省交通运输厅提出并组织实施。

本文件由广东省交通运输标准化技术委员会铁路工程分技术委员会归口（GD/TC133/SC3）。

主编单位：广东省铁路建设投资集团有限公司

参编单位：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

主 编：祁军

参编人员：黄林冲、马建军、谭代明、袁作波、姜效光、夏斌、靳昆、李梦龙、杨昆、王建仓、梁禹、胡文忠、林越翔、杨喆、杨宏伟、顾慧、吕少宏、黄帅、赖正首、钟仕兴、肖旺

主 审：杨光华

参与审查人员：王新、许传博、李世久、喻锐、梁育辉、黄继雄、廖水生、覃耀青、刘吉福、潘泓、童华炜、黄俊光、郭典塔

引 言

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联合编制的《铁路工程加芯水泥土搅拌桩复合地基技术指南》(以下简称《指南》),旨在为广东省铁路工程加芯水泥土搅拌桩复合地基的设计计算、施工及质量检验,提供系统性和规范化的指导。该指南的发布是推动铁路建设高质量发展、打造“轨道上的大湾区”和助力交通强省建设的重要体现。

《指南》中介绍的加芯水泥土搅拌桩技术,作为我国自主研发的新型复合地基处理技术,结合了混凝土桩与水泥土搅拌桩的技术优势,充分发挥二者特点,显著提高地基的承载力并有效控制沉降,为软基地区铁路建设中的一系列技术难题提供创新的解决方案。

《指南》共分为 7 个章节,涵盖了加芯水泥土搅拌桩复合地基从勘察到工程验收的全过程技术要求,详细阐述了各环节的技术要点与实施标准,为铁路工程技术人员提供了详细的操作指引,有助于统一技术要求、提升施工质量和效率,确保铁路建设项目顺利实施,符合高质量发展目标。

希望本指南能够为从事铁路工程设计、施工、监理等相关单位提供技术支持,并为铁路地基处理领域的技术人员、工程管理人员提供实践指导,推动未来铁路建设项目的高质量实施。

谨向广大铁路建设领域的技术人员、工程管理人员推荐本指南。

全国勘察设计大师 
2025 年 10 月 15 日

铁路工程加芯水泥土搅拌桩复合地基技术指南

1 范围

本文件提出了加芯水泥土搅拌桩复合地基的总则、设计、施工、验收等建议。
本文件适用于广东省铁路工程加芯水泥土搅拌桩复合地基处理。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过指南的规范性引用而构成本指南必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本指南；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 12523 建筑施工场界环境噪声排放标准
- GB 50007 建筑地基基础设计规范
- GB/T 50010 混凝土结构设计规范
- GB 50021 岩土工程勘察规范
- GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范
- GB/T 50783 复合地基技术规范
- GB 51004 建筑地基基础工程施工规范
- GB 55003 建筑与市政地基基础通用规范
- JGJ 79 建筑地基处理技术规范
- JGJ/T 233 水泥土配合比设计规程
- JGJ/T 327 劲性复合桩技术规程
- TB 10001 铁路路基设计规范
- TB 10035 铁路特殊路基设计规范
- TB 10093 铁路桥涵地基和基础设计规范
- TB 10106 铁路工程地基处理技术规程
- TB 10218 铁路工程桩基检测技术规程
- TB 10414 铁路路基工程施工质量验收标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

芯桩 corepile
由混凝土材料预制而成的加强体。

3.2

加芯水泥土搅拌桩 concrete core mixing pile
水泥土搅拌桩中压入芯桩的复合桩。

3.3

外包体 outsourcing body

加芯水泥土搅拌桩中预制芯桩以外的水泥土部分。

3.4

外界面 outer interface

加芯水泥土搅拌桩中水泥土与桩侧土间的界面。

3.5

内界面 inner interface

加芯水泥土搅拌桩中水泥土与芯桩间的界面。

3.6

短芯搅拌桩 short-core mixing pile

芯桩底端面高于搅拌桩底端面的加芯水泥土搅拌桩。

3.7

长芯搅拌桩 long-core mixing pile

芯桩底端面低于搅拌桩底端面的加芯水泥土搅拌桩。

3.8

加芯水泥土搅拌桩复合地基 core mixing pile composite foundation

以加芯水泥土搅拌桩为竖向增强体的复合地基。

4 总则

4.1 加芯水泥土搅拌桩（以下简称加芯搅拌桩）复合地基应符合 TB10106 的规定。

4.2 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。

4.3 加芯搅拌桩的常用桩型可为圆台形、柱形、管形、倒棱台形等。

4.4 加芯搅拌桩可作为复合地基的增强体，用于处理淤泥与淤泥质土、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。

4.5 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、欠固结软土或在无工程经验的地区使用时，宜通过室内或现场试验确定其适应性。

4.6 加芯搅拌桩复合地基处理工程的岩土工程勘察报告，包括填土层、软土层、持力层和下卧层的深度、厚度、分布范围、土的工程物理力学性质指标及必要的设计参数。

4.7 加芯搅拌桩复合地基宜在施工前进行成桩试验，确定施工参数和工艺要求，并通过载荷试验确定单桩及复合地基承载力特征值。

4.8 加芯搅拌桩复合地基宜根据需要开展沉降变形观测与评估工作。

5 设计

5.1 一般原则

5.1.1 加芯搅拌桩复合地基设计前宜收集地质、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除满足承载力、工后沉降和稳定性要求，宜符合下列规定：

a) 当在受力层范围内仍存在软弱下卧层时，进行软弱下卧层地基承载力计算。

b) 对承受较大水平荷载或位于坡地、岸边的复合地基进行稳定性分析。

5.1.3 水泥宜选用强度等级为 42.5 级及以上的普通硅酸盐水泥，通过试验确定合适的水泥掺量。

5.2 选型与布置

5.2.1 加芯搅拌桩选型宜采用下列原则：

a) 短芯搅拌桩适用于单桩承载力要求不高，且浅层地基土无良好桩端持力层的复合地基增强体；长芯搅拌桩适用于桩基单桩承载力要求较高，且地表以下一定深度范围内存在较好桩端持力层的复合地基增强体；

b) 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 15 m，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 15 m 深层地基处理时，宜优先选用长芯搅拌；

c) 短芯搅拌桩用于复合地基增强体时，如果搅拌桩已穿透软弱土层，允许设计采用芯桩长度比较小的技术特征参数，可根据试验和计算结果适当减小芯桩长度；

d) 芯桩可分为预制混凝土管桩、空心方桩、实心方桩，芯桩的选型宜按表 1 采用；

表 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

e) 水泥土复合体桩的外包体厚度宜为 50 mm~200 mm，桩芯采用预应力方桩时，外包体厚度为方桩角部厚度；

f) 短芯搅拌桩芯桩长小于或等于 10 m 时，宜优先选用倒棱台形预制混凝土芯桩；芯桩长大于 10 m 时，宜选用预应力管桩；

g) 长芯搅拌桩芯桩宜优先选用预应力管桩。

5.2.2 加芯搅拌桩长度宜符合以下规定：

a) 加芯搅拌桩桩长不宜超过 30 m；

b) 竖向承载加芯搅拌桩的长度宜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；

c) 宜选择中、低压缩性土层作为桩端持力层。当持力层下存在软弱下卧层时，桩端以下持力层厚度对长芯搅拌桩不宜小于 $3d_c$ ；

d) 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 2 m。

5.2.3 芯桩直径与水泥土桩直径（边长）符合下列规定：

a) 芯桩直径与水泥土桩直径（边长）之差不应小于 300 mm；

b) 与芯桩直径（边长）匹配的水泥土桩直径可参考表 2 取值，当水泥土桩长径比较大时、水泥土掺灰量较低时取小值，芯桩采用方桩时取大值。

表 2 芯桩直径（边长）与相应的水泥土桩直径 单位为毫米

d_c	300	400	500	600	800
D	600~800	700~900	800~1000	1000~1200	1200~1400
注： d_c -芯桩直径或方桩边长 D -搅拌桩直径					

5.2.4 加芯搅拌桩的布置应符合下列规定：

a) 加芯搅拌桩宜根据上部结构类型、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；

b) 加芯搅拌桩桩间距宜根据基础形式、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 $3D$ 。

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采用布桩型式。用于桩基时中心距不宜小于 $3D$ 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桩帽边缘的距离应符合下列规定：

a) 边桩中心至桩帽边缘的距离不宜小于 $d_c (h_c)$ ，且加芯搅拌桩外边缘至桩帽边缘的距离不小于 100 mm；

b) 对条形桩基加芯搅拌桩外边缘至桩帽梁边缘的距离不小于 50 mm。

5.3.2 当芯桩采用管桩、空心方桩时，加芯搅拌桩与桩帽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：

a) 芯桩嵌入桩帽内的长度，当 $d_c (h_c)$ 小于 800 mm 时，不宜小于 50 mm；当 $d_c (h_c)$ 不小于 800 mm 时，不宜小于 100 mm；

b) 填芯混凝土深度不应小于 $5d_c (h_c)$ ，且不小于 3 m；

c) 填芯混凝土强度等级不低于桩帽混凝土强度等级，且不低于 C30，采用无收缩混凝土或微膨胀混凝土；

d) 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_c 不大于 500 mm 时，配筋率不宜小于 0.6%， d_c 不小于 800 mm 时不宜小于 0.4%，中间按插入计算，数量不宜少于 4 根；

e) 填芯混凝土中宜连接锚固钢筋；

f) 受压桩锚固钢筋锚入桩帽内长度不应小于 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下列要求：

5.4.1.1 荷载效应标准组合符合公式（1）和（2）的要求：

a) 轴心竖向力作用下基桩的平均竖向力满足公式（1）的要求：

$$N_K \leq R_a \cdots \cdots \cdots (1)$$

式中：

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）；

R_a ——单桩竖向承载力特征值（kN）。

b) 偏心竖向力作用下，除满足上公式（1）外，尚应满足下式的要求：

$$N_{k\max} \leq 1.2R_a \cdots \cdots \cdots (2)$$

式中：
 $N_{K\max}$ ——荷载效应标准组合偏心竖向力作用下，桩顶最大竖向力（kN）。

5.4.1.2 基桩的竖向力符合公式（3）和（4）的要求：

a) 轴心竖向力作用下

$$N_{EK} \leq 1.25R_a \cdots \cdots \cdots (3)$$

式中：
 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）。

b) 偏心竖向力作用下除满足公式（3）外，尚应满足下式要求：

$$N_{EK\max} \leq 1.5R_a \cdots \cdots \cdots (4)$$

式中：
 $N_{EK\max}$ ——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 应按下列式确定：

$$R_a = \frac{1}{K} Q_{uk} \cdots \cdots \cdots (5)$$

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

加芯搅拌桩单桩竖向承载力特征值宜按 GB 50007 的相关规定通过单桩竖向静载荷试验确定。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 。

a) 加芯搅拌桩桩侧破坏面位于内、外芯界面时，长芯桩竖向抗压承载力特征值可按公式（6）计算：

$$R_a = u^c q_{sa}^c l^c + u^c \sum q_{sja}^c l_j + q_{pa}^c A_p^c \cdots \cdots \cdots (6)$$

b) 加芯搅拌桩桩侧破坏面位于内、外芯界面时，短芯桩竖向抗压承载力特征值可按公式（7）计算：

$$R_a = u^c q_{sa}^c l^c + q_{pa}^c A_p^c \cdots \cdots \cdots (7)$$

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，宜取室内相同配比水泥土试块在标准条件下 90 天龄期的立方体（边长 70.7 mm）无侧限抗压强度的（0.04~0.08）倍，当内芯为预制混凝土类桩或外芯水泥土桩采用干法施工时宜取较高值；

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 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。对长芯桩也可根据芯桩桩型按现行行业标准 JGJ 94 取值。

c) 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公式（8）和（9）计算：

长芯桩： $R_a = u \sum \varepsilon_{si} q_{sia} l_i + u^c \sum q_{sja}^c l_j + q_{pa}^c A_p^c \cdots \cdots \cdots (8)$

短芯桩： $R_a = u \sum \varepsilon_{si} q_{sia} l_i + \alpha \varepsilon_p q_{pa}^c A_p^c \cdots \cdots \cdots (9)$

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^c ——加芯搅拌桩桩身截面积（m²）；

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 3 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} 、 ε_p ——分别为加芯搅拌桩复合段外包体第 i 土层侧阻力调整系数、端阻力调整系数。

d) 加芯搅拌桩复合段外包体第 i 土层侧阻力调整系数、端阻力调整系数宜按广东地区经验取值，无经验时，可按表 4 取值。

表 3 加芯搅拌桩的外包体侧阻力特征值 q_{sia}

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	$I_L > 1.00$	12~19
	软塑	$0.75 < I_L \leq 1.00$	19~25
	可塑	$0.50 < I_L \leq 0.75$	25~34
	硬可塑	$0.25 < I_L \leq 0.50$	34~42
	硬塑	$0 < I_L \leq 0.25$	42~48
	坚硬	$I_L \leq 0$	48~51

表 3（第 2 页/共 2 页）			
粉土	稍密	$e>0.90$	12~22
	中密	$0.75<e\leq 0.90$	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

表 4 加芯搅拌桩复合段外包体侧阻力调整系数 ε_{si} 、端阻力调整系数 ε_p

调整系数	土的类别				
	淤泥	黏性土	粉土	粉砂	细砂
ε_{si}	1.30~1.60	1.50~1.80	1.50~1.90	1.70~2.10	1.80~2.30
ε_p	—	2.00~2.20	2.00~2.40	2.30~2.70	2.50~2.90

5.4.4 加芯搅拌桩中芯桩桩身混凝土轴心抗压强度设计值应按公式（10）计算：

a) 轴心受压桩正截面受压承载力应符合下列规定：

$$N \leq \psi_c f_c A_c \cdots \cdots \cdots (10)$$

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；

ψ_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 GB 50010 的规定取值；

A_c ——芯桩桩身截面面积（m²）。

b) 当芯桩桩身抗压承载力不满足公式（10）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：

$$N \leq \psi_c f_c A_c + 0.7 f_{co} A_{co} \cdots \cdots \cdots (11)$$

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（m²）。

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 GB 50007、JGJ 79、JGJ 94 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。

a) 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 JGJ 79 及本指南 6.1 条执行；

b) 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；

c) 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 η_d 取 1.0，对其他土类埋深修正系数取 0.85， η_d 见 GB 50007 第 5.2.4 条；

d) 初步设计时，复合地基承载力特征值可按公式 (12) 计算：

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \dots\dots\dots (12)$$

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，可参照 JGJ79；

R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值 (kN)；

β ——桩间土承载力折减系数，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 (13) 和 (14) 计算：

$$S = S_1 + S_2 \dots\dots\dots (13)$$

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)。

a) 复合土层或土层压缩变形量可按公式 (14) 计算：

$$S_1 = \psi_{s1} \sum \frac{\Delta p_i l_{0i}}{E_{spi}} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

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 JGJ 79 的规定取值；

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)。

b) 加固区下卧土层压缩变形量可按公式 (15) 计算：

$$S_2 = \psi_{s2} \sum \frac{\Delta p_{i0i}}{E_{si}} \dots\dots\dots (15)$$

式中：
 E_{si} ——第 i 层土层的压缩模量（MPa）；
 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 GB 50007 的规定取值；

$$E_{spi} = mE_{pi} + (1 - m)E_{si} \dots\dots\dots (16)$$

式中：
 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_{pi} ——桩体压缩模量（MPa）。
 桩体压缩模量可分下列三种情况考虑：

- 1) 只有芯桩无外包体， $E_{pi} = E_{pih}$ ， E_{pih} 为芯桩的压缩模量；
- 2) 只有外包体无芯桩， $E_{pi} = E_{pij}$ ， E_{pij} 为外包体的压缩模量；
- 3) 既有芯桩也有外包体， $E_{pi} = [A_c \cdot E_{pih} + A_p \cdot E_{pij}] / (A_c + A_p)$ ，其中 A_p 和 A_c 分别为搅拌桩外包体和芯桩的截面积。

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。

5.5.2.1 高速铁路、无砟轨道地基

a) 地基压缩系数 $a_{0.1 \sim 0.2}$ 大于等于 0.3MPa^{-1} 时，地基压缩层的计算深度按公式（17）计算：

$$\sigma_z = 0.1\sigma_l \dots\dots\dots (17)$$

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）。

b) 地基压缩系数 $a_{0.1 \sim 0.2}$ 小于 0.3MPa^{-1} 时，地基压缩层的计算深度按公式（18）计算：

$$\sigma_z = 0.2\sigma_l \dots\dots\dots (18)$$

c) 计算深度以下有软土层时应继续增加计算深度。

5.5.2.2 其他铁路地基

- a) 软土地基压缩层的计算深度按公式（17）计算。
- b) 其他地基压缩层的计算深度按公式（18）计算。

5.5.3 铁路工程地基工后沉降量应按公式（19）计算：

$$S_r = S - S_T \dots\dots\dots (19)$$

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）。

$$S_T = \eta S' \cdots \cdots \cdots (20)$$

式中：

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 取值。

表 5 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（0.1~0.3）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 6 的要求。

表 6 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（差异沉降）（mm）	沉降速率（mm/ 年）	
有砟 轨道	客货共线 铁路	200 km/h	≤150	≤80	≤40	
		200 km/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； 注 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 0.4v²时（v 为设计速度），工后沉降控制 限值为 30 mm。						

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 7 确定。

表 7 路堤填料物理力学指标

填料种类	黏聚力 $c(\text{kPa})$	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;			
注 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 8 确定。

表 8 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,实际工程中宜根据不同检算工况选用;								
注 2: 室内剪切试验宜以三轴剪切试验为主;								
注 3: “√”表示优先采用,“△”表示可采用;								
注 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宜按公式 (21) 和 (22) 计算:

$$c_{sp} = mc_p + (1 - m)c_s \dots\dots\dots (21)$$

式中:

c_{sp} ——复合地基的黏聚力 (kPa) ;

c_s ——桩间土天然抗剪黏聚力 (kPa) ;

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

m ——复合地基置换率;

$$\varphi_{sp} = \varphi_s \dots\dots\dots (22)$$

式中：

φ_{sp} ——复合地基的内摩擦角（°）；

φ_s ——桩间土天然抗剪内摩擦角（°）。

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 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 可按公式（23）进行计算，计算模型如图 1 所示。

$$F_s = \frac{M_{RS} + M_{RP} + M_{RR}}{M_D} \dots\dots\dots (23)$$

式中：

M_D ——滑动土条单位宽度下滑力矩（kN·m/m）；

M_{RS} ——地基土内桩间土和路堤内（BC）土条的单位宽度抗滑力矩之和（kN·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·m/m）；

M_{RR} ——垫层筋带单位宽度抗滑力矩（kN·m/m）。

式中， M_D 、 M_{RS} 、 M_{RR} 按式（24）～（28）计算：

$$M_D = P_T R \dots\dots\dots (24)$$

式中：

P_T ——各土条在滑弧切线方向的单位宽度下滑力总和（kN/m）；

R ——滑动圆弧半径（m）。

$$P_T = \sum W_i \sin \alpha_i + \sum W_j \sin \alpha_j \dots\dots\dots (25)$$

式中： W_i 、 W_j ——第 i、j 土条单位宽度重量（kN/m）。

$$M_{RS} = (\sum S_i + \sum S_j) R \dots\dots\dots (25)$$

式中：

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)。

$$S_i = W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_{spi} + c_{spi} l_i \dots\dots\dots (27)$$

式中：

α_i 、 α_j ——第*i*、*j*土条底滑面的倾角(°)；

c_{spi} 、 φ_{spi} ——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黏聚力(kPa)

及内摩擦角(°)。

$$M_{RR} = T_g l_T \dots\dots\dots (28)$$

式中：

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)。

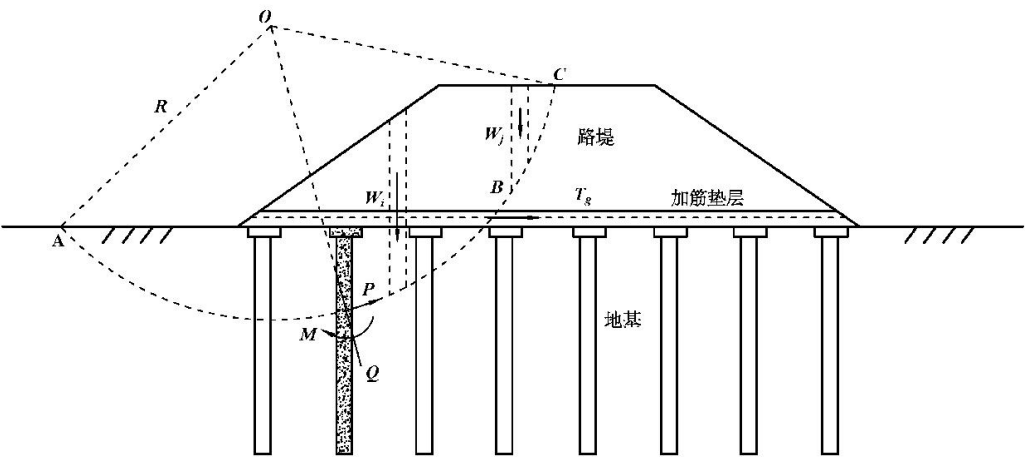


图 1 加固土桩复合地基的圆弧滑动法计算模型

5.6.7 路基稳定性计算分析得到的稳定系数宜按下列要求：

a) 路基最小稳定安全系数不得小于表 9 所列值；

表 9 路基最小稳定安全系数

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

表 9（第 2 页/共 2 页）		
$v \leq 120$	1.10	1.20
注 1：对于斜坡软弱地基路堤，采用圆弧滑动法检算时，其稳定系数应根据软弱地基横向坡度大小，在表 9 规定的最小稳定安全系数[Fs]的基础上按表 10 进行修正。		

b) 斜坡软弱地基最小稳定安全系数不得小于表 10 所列值。

表 10 斜坡软弱地基最小稳定安全系数

软弱地基横向坡度	水平地基	1:20	1:10	1:7.5
最小稳定安全系数	[Fs]	[Fs]+0.05	[Fs]+0.10	[Fs]+0.15

6 施 工

加芯搅拌桩施工步骤为：

- a) 场地平整及测量放样；
- b) 水泥土搅拌桩机就位、调平；
- c) 预搅下沉喷浆至设计加固深度；
- d) 按施工工艺下上重复喷浆、搅拌；
- e) 完成水泥土搅拌桩制作后，关闭搅拌机械并移位；
- f) 静力压芯桩机械就位、调平；
- g) 静力压入预制混凝土芯桩或现场复打制作混凝土芯桩；
- h) 移位重复步骤 a) ~g) 进行下一根桩施工。

6.1 芯桩预制

6.1.1 预制混凝土芯桩制作宜符合以下要求：

- a) 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；
- b) 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；
- c) 芯桩钢筋骨架允许偏差见表 11；

表 11 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

d) 混凝土粗骨料粒径不宜大于 25mm；

- e) 预制芯桩单节长度不宜大于 10m;
- f) 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；
- g) 芯桩制作质量要求和偏差见表 12；

表 12 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

h) 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、吊装出现的裂缝宽度不应大于 0.2 mm，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。

i) 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。

6.1.2 预制混凝土芯桩的起吊宜按以下要求：

- a) 预制芯桩在吊装过程中应轻吊轻放，防止碰撞损伤；
- b) 预制芯桩不宜在施工现场多次倒运；
- c) 预制芯桩长度不大于 15 m，且符合现行相应国家、行业、地方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°。

6.1.3 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。

6.1.4 预制芯桩的现场堆放应符合下列规定：

- a) 堆放场地应平整坚实，排水条件良好；
- b) 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；
- c) 应按不同规格、长度及施工流水顺序分类堆放；
- d) 堆叠的层数应满足地基承载力的要求。

6.1.5 施工现场移桩应符合下列规定：

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

6.1.6 宜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宜少于总桩数的 1%，且不应少于 3 点（根）。桩间表层土松软，设计不考虑桩间土受力时，可仅进行单桩载荷试验。

6.2 水泥土搅拌桩

水泥土搅拌桩施工及质量控制应遵照 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：

- a) 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，并使搅拌提升速度与输浆速度匹配；
- b) 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；
- c) 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 r/min~25 r/min，钻进困难时可注入少量水泥浆；
- d) 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 50 mm；成桩直径和桩长不应小于设计值；
- e) 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；
- f) 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，搅拌升降速度不宜大于 2 m/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 mm~500 mm。在开挖基坑时，应将搅拌桩顶端成桩质量较差的桩段挖除；
- g) 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；
- h) 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各 3 m 范围内应喷浆复搅一次；
- i) 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；
- j) 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；
- k) 施工中应做好施工记录，宜包括每根桩搅拌时间、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。
- l) 搅拌桩成桩后至芯桩植入的时间间隔应根据成桩工艺试验确定；
- m) 发现工程地质勘察报告未说明的新近杂填土、软土时，应及时通知有关部门处理。

6.3 芯桩植入

6.3.1 预制混凝土芯桩植入宜遵守如下规定：

- a) 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。
- b) 桩位控制：沉桩前桩位应做好标记，沉桩 0.5 m~1.0 m 时垂直度偏差不应大于 0.5%。
- c) 接桩：入土桩节的桩头高出地面 0.5 m~1.0 m 时进行接桩，接桩方式可采用焊接和机械。
- d) 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 0.3 m~0.5 m；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。
- e) 芯桩底端标高不宜高于设计标高。
- f) 短芯防沉措施：在施工前可安装导向架或定位架，确保短芯桩在植入时保持垂直并且位置准确；必要时，可在芯桩的顶部或底部设置锚定装置，如锚杆或锚板；芯桩插入到位后，对桩顶进行适当保护处理，如设置桩帽。

6.3.2 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：

- a) 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。

- b) 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。
- c) 桩头混凝土剥落、破碎，或桩身混凝土出现裂缝或破碎。
- d) 地面明显隆起、邻桩上浮或位移过大。

6.3.3 静压法沉桩应符合以下规定：

6.3.3.1 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。

6.3.3.2 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。

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

6.3.3.4 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。

6.3.3.5 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，长芯桩施工时应避免在接近持力层时接桩。

6.3.3.6 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。

6.4 桩帽连接

在桩顶设置加筋垫层，宜符合以下要求：

a) 加筋垫层厚度宜为 200 mm~700 mm；

b) 加筋砂垫层宜采用砾砂、粗砂、中砂，加筋碎石垫层宜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；

c) 垫层材料不宜含草根、垃圾等杂质，碎石垫层细粒含量不宜大于 10%，砂垫层细粒含量不宜大于 5%，用作排水固结的砂垫层细粒含量不宜大于 3%；

d) 垫层具有排水功能时，垫层材料宜具有良好的透水性；加筋垫层土工合成材料宜选用耐久性好的土工格栅、土工格室或土工织物等，宜具有高强度、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；

e) 宜做混凝土桩帽，插入加筋垫层内 50 mm~100 mm；

f) 加筋垫层施工质量满足复合地基设计要求。

6.5 施工安全

6.5.1 施工现场标识应完备，包括警示标志、安全标志等。施工人员应经过三级教育后进场。施工前应对设备进行安全检查。

6.5.2 根据具体的施工条件和工地环境，制定专项施工方案，开展安全技术交底，并明确各个施工环节的安全要求和注意事项。

6.5.3 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。应定期召开安全工作会议及开展现场安全检查工作。

6.5.4 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 GB 12523 等规定。

7 验收

7.1 一般规定

- 7.1.1 加芯搅拌桩应依据铁路相关规范进行质量检测与工程验收。
- 7.1.2 加芯搅拌桩复合地基验收应在施工完成后，由建设单位组织勘察、设计、施工、监理等单位共同进行，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。
- 7.1.3 加芯搅拌桩工程验收应包括但不限于下列资料：
- a) 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；
 - b) 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；
 - c) 桩位测量放线图及工程桩位复验签证；
 - d) 预制芯桩验收及质量合格证；
 - e) 桩施工质量检验资料及芯桩完整性检测报告；
 - f) 单桩及复合地基载荷试验报告、工程桩复验报告。

7.2 主控项目

- 7.2.1 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：
- a) 成桩后 3 天内，用轻型动力触探检查桩身的均匀性。检验数量为施工总桩数 1%，且不少于 3 根；
 - b) 成桩 7 天后，采用浅部开挖桩头（深度宜超过停浆面下 0.5 m）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；
 - c) 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；
 - d) 水泥土搅拌桩的均匀性、完整性符合 GB 50021、JGJ 79 的要求。
- 7.2.2 加芯搅拌桩芯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。
- a) 完整性检验的抽检数量不应小于总桩数的 10%，且不应少于 20 根；
 - b) 桩身完整性检验评定应提出每根受检桩的桩身完整性类别。根据 TB 10218，桩身完整性分为 I~IV 类，具体分类原则见表 13；

表 13 桩身完整性类别表

桩身完整性类别	分类原则
I	桩身完整
II	桩身存在轻微缺陷，不会影响桩身结构承载力的正常发挥
III	桩身存在明显缺陷，对桩身结构承载力有影响
IV	桩身存在严重缺陷

c) I、II 类为合格桩，III 类桩需由相关建设、监理、设计等单位共同研究确定处置方案，IV 类桩为不合格桩。

7.2.3 加芯搅拌桩复合地基承载力采用复合地基载荷试验和单桩载荷试验予以确定，载荷试验宜在桩身条件满足试验荷载条件时，且成桩 28 天后进行。施工完成后的工程桩，宜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）。

7.2.4 复合地基载荷试验宜根据软土地基特点补充以下要点：

- a) 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；

b) 加荷等级不应小于 8 级，最大加载量不应小于设计要求的两倍；

c) 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承载力，且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；

d) 单桩竖向静载荷试验除判定各试桩的单桩极限承载力外，还应剔除失真的试桩，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。

7.3 一般项目

加芯水泥土搅拌桩复合地基除主控项目外，宜对桩位、桩顶（底）标高、成桩直径、垂直度及搭接长度等一般项目进行检验，其允许偏差、抽检比例及合格判定应符合下列规定：

a) 机头提升速度不应大于 0.5m/min。按总桩数的 20%进行抽查，且不少于 20 处，实测合格率应达到 95%及以上。

b) 桩底标高允许偏差为 $\pm 200\text{mm}$ 。按总桩数的 20%进行抽查，且不少于 20 处，实测合格率应达到 95%及以上。

c) 桩顶标高允许偏差为 $+100\text{mm}$ 、 -50mm 。按总桩数的 20%进行抽查，且不少于 20 处，实测合格率应为 100%。

d) 桩位偏差应小于 50mm。按总桩数的 20%进行抽查，且不少于 20 处，实测合格率应为 100%。

e) 成桩直径允许偏差应小于 0.04 倍设计桩径（设计桩径 500mm 时，允许偏差为 20mm）。按总桩数的 20%进行抽查，且不少于 20 处，实测合格率应为 100%。

f) 桩身垂直度偏差不应大于 1.5%桩长。按总桩数的 20%进行抽查，且不少于 20 处，实测合格率应为 100%。

g) 搅拌桩搭接长度应大于 200mm。按总桩数的 20%进行抽查，且不少于 20 处，实测合格率应为 100%。

h) 上述检验应在成桩后 3d 内完成；若任一项目合格率未达到规定值，须制定整改措施并重新检验，直至满足要求后方可进入下一道工序。