

ICS 93.020

CCS P22

团 体 标 准

T/WHCIA-1008—2025

城市道路软弱土地基处理技术规程

Technical specifications for soft soil ground improvement of urban roads

WHCIA

2025-08-01 发布

2025-09-01 实施

武汉建筑业协会 发布

团 体 标 准

城市道路软弱土地基处理 技术规程

Technical specifications for soft soil ground
improvement of urban roads

T/WHCIA-1008—2025

主编单位：武汉市政工程设计研究院有限责任公司

武汉设计咨询集团有限公司

批准单位：武汉建筑业协会

施行日期：2025 年 09 月 01 日

中国建设科技出版社有限责任公司

China Construction Science and Technology Press Co., Ltd.

2025 北 京

团体标准

城市道路软弱土地基处理技术规程

Technical specifications for soft soil ground

improvement of urban roads

T/WHCIA-1008—2025

*

出版：中国建设科技出版社有限责任公司

地址：北京市西城区白纸坊东街2号院6号楼

各地新华书店、建筑、建材书店经销

印刷：北京印刷集团有限责任公司

开本：850mm×1168mm 1/32 印张：4 字数：80千字

2025年7月第1版 2025年7月第1次印刷

*

统一书号：155160·5928

定价：68.00元

版权所有 翻印必究

(邮政编码 100054)

本社网址：www.jskjcbs.com

关于批准发布《城市道路软弱土地基处理 技术规程》团体标准的公告

根据《团体标准管理规定》以及《武汉建筑业协会团体标准制定程序》的相关规定，现批准团体标准《城市道路软弱土地基处理技术规程》（标准号：T/WHCIA-1008—2025）发布。可通过武汉建筑业协会官网（<http://www.whjzyxh.org/>）或全国团体标准信息平台（<http://www.ttbz.org.cn/>）查询。

武汉建筑业协会
2025 年 7 月 16 日

WHCIA



WHCIA

前 言

为引导和规范湖北省内城市（包括主城区、远城区）道路新建、改建和扩建工程软弱土地基处理工程建设，促进城市交通安全运行、城市基础设施稳定和社会经济的可持续发展，制定本规程。

本规程在编制过程中，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，最后经审查定稿。

本规程共分 17 章和 5 个附录，主要技术内容包括：1. 总则；2. 术语和符号；3. 基本规定；4. 工程勘察与环境调查；5. 沉降与稳定计算；6. 换填垫层与压实地基；7. 夯实地基；8. 预压地基；9. 水泥土搅拌桩复合地基；10. 高压旋喷桩复合地基；11. 水泥粉煤灰碎石桩及素混凝土桩复合地基；12. 预制桩复合地基；13. 多向加芯搅拌桩复合地基；14. 环境影响因素与保护措施；15. 施工安全与环保；16. 监测；17. 验收。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由武汉建筑业协会标准管理办公室归口管理，由武汉市市政工程设计研究院有限责任公司解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送武汉市市政工程设计研究院有限责任公司（地址：湖北省武汉市汉口常青路 40 号，邮编：430023）。

主 编 单 位：武汉市市政工程设计研究院有限责任公司
武汉设计咨询集团有限公司

参 编 单 位：武汉轻工工程技术有限公司
湖北擎岩智能桩工有限公司
中建三局第一建设工程有限责任公司
中国一冶集团有限公司

主要起草人：和礼红 汪小南 吕锦刚 齐同湘 刘柏强
张乘胜 蔡 清 刘堰陵 鲜少华 郑盘石
代 杰 段昌恒 高 波 李继能 郭克诚
李常钦 代健州 张睦雅 颜 斌 万纯斌
汪惠文 彭青顺 吴晓峰 燕惠英 郭 开
李海军 李 寅 陈 芬 喻贤波
主要审查人：邓利明 刘珍珍 张季如 庞建成 陈庆敏



目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	4
3	基本规定	8
4	工程勘察与环境调查	11
4.1	一般规定	11
4.2	工程勘察	11
4.3	环境调查	12
5	沉降与稳定计算	14
5.1	一般规定	14
5.2	沉降计算	14
5.3	稳定性分析	16
5.4	桩体复合地基承载力计算	17
6	换填垫层与压实地基	19
6.1	一般规定	19
6.2	设计	20
6.3	施工	22
6.4	质量控制与检测	23
7	夯实地基	24
7.1	一般规定	24

7.2	设计	24
7.3	施工	26
7.4	质量控制与检测	27
8	预压地基	28
8.1	一般规定	28
8.2	设计	28
8.3	施工	35
8.4	质量控制与检测	36
9	水泥土搅拌桩复合地基	39
9.1	一般规定	39
9.2	设计	39
9.3	施工	40
9.4	质量控制与检测	41
10	高压旋喷桩复合地基	42
10.1	一般规定	42
10.2	设计	42
10.3	施工	43
10.4	质量控制与检测	43
11	水泥粉煤灰碎石桩及素混凝土桩复合地基	45
11.1	一般规定	45
11.2	设计	45
11.3	施工	46
11.4	质量控制与检测	46
12	预制桩复合地基	48
12.1	一般规定	48

12.2	设计	48
12.3	施工	48
12.4	质量控制与检测	50
13	多向加芯搅拌桩复合地基	52
14	环境影响因素与保护措施	54
14.1	一般规定	54
14.2	环境影响因素	54
14.3	对环境的保护措施	55
15	施工安全与环保	58
15.1	施工安全	58
15.2	环保	61
16	监测	63
16.1	一般规定	63
16.2	监测项目	64
16.3	监测点布置	65
16.4	监测方法及精度要求	66
16.5	监测频率及沉降稳定标准	67
16.6	监测成果	67
17	验收	69
17.1	一般规定	69
17.2	夯实地基	70
17.3	预压地基	71
17.4	水泥土搅拌桩复合地基	72
17.5	高压旋喷桩复合地基	73
17.6	水泥粉煤灰碎石桩及素混凝土桩复合地基	74

17.7 预制桩复合地基 75

附录 A 地基与基础工程验槽（规范性） 77

附录 B 处理后地基静载试验要点（规范性） 80

附录 C 复合地基静载试验要点（规范性） 82

附录 D 复合地基增强体单桩静载试验要点（规范性） 85

附录 E 预应力管桩复合地基（资料性） 87

本标准用词说明 89

引用标准名录 90

条文说明 91



1 总 则

1.0.1 为规范城市道路软弱土地基处理，促进城市道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，制定本规程。

1.0.2 本规程规定了城市道路软弱土地基处理的勘察、设计、施工、质量控制与检测、环境影响因素与保护措施、施工安全与环保、监测与验收等基本原则和相关技术要求。

1.0.3 本规程适用于湖北省内城市（包括主城区、远城区）道路新建、改建和扩建工程软弱土地基处理。

1.0.4 城市道路软弱土地基处理设计与施工应采用安全、可靠、经济的新技术、新材料、新设备、新工艺。

1.0.5 城市道路软弱土地基处理除应符合本规程外，尚应符合国家、行业和本省有关标准的规定。

WHCIA

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 城市道路 urban road

分布在城市范围内的各级道路，道路断面一般包括机动车道、非机动车道、人行道、分车带、设施带、绿化带等；道路下方分布给水、排水、燃气、电信电力等管线。

2.1.2 软弱土地基 soft soil ground

压缩层主要由淤泥、淤泥质土，软塑或流塑黏性土、以软塑或流塑状黏性土为主的互层土、松散状态人工填土或其他高压缩性土构成的地基。软弱土地基承载力特征值一般不超过 70kPa。

2.1.3 地基处理 ground improvement

为提高地基承载力，改善其变形或渗透性能而采取的人工处理地基的方法。

2.1.4 复合地基 composite foundation

在地基处理过程中，部分土体得到增强或被置换，由天然地基土体和增强体两部分组成共同承担荷载的人工地基。

2.1.5 桩体复合地基 pile-reinforced composite foundation

以桩作为地基中的竖向增强体并与地基土共同承担荷载的人工地基，又称竖向增强体复合地基。

2.1.6 换填垫层 replacement layer of compacted fill

挖除表面浅层软弱土层或不均匀土层，回填性能稳定、无侵蚀性、强度较高的材料，并夯填密实形成的垫层。

2.1.7 压实地基 compacted ground

利用平碾、振动碾、冲击碾或其他碾压设备将填土分层密实处理的地基。

2.1.8 强夯 dynamic compaction

将夯锤提升到高处使其自由落下，给地基施加冲击和振动能量，将地基土夯实的地基处理方法。

2.1.9 强夯置换 dynamic compaction replacement

将夯锤提升到高处使其自由落下形成夯坑，并不断夯击坑内回填的碎石等硬填料，使其形成密实墩体的地基处理方法。

2.1.10 堆载预压 surcharge preloading

地基上堆加荷载，使地基土固结压密的地基处理方法。

2.1.11 真空预压 vacuum preloading

通过对覆盖于竖井表面的封闭薄膜内地基抽真空排水，使地基土固结压密的地基处理方法。

2.1.12 水泥土搅拌桩复合地基 composite foundation with cement-soil mixing pile

以水泥作为固化剂的主要材料，通过深层搅拌机械，将固化剂和地基土强制搅拌形成竖向增强体的复合地基。

2.1.13 旋喷桩复合地基 composite foundation with high-pressure rotary jet pile

通过钻杆的旋转、提升，高压水泥浆或高压水由喷嘴喷出，形成喷射流，以此切割土体并使水泥浆与土混合形成水泥土竖向增强体的复合地基。

2.1.14 水泥粉煤灰碎石桩复合地基 composite foundation with cement fly-ash gravel pile

由水泥、粉煤灰、碎石等混合料加水拌合在地基土中灌注形成竖向增强体的复合地基。

2.1.15 素混凝土桩复合地基 composite foundation with plain concrete pile

由水泥、碎石、砂等混合料加水拌合在地基土中灌注形成竖向增强体的复合地基。

2.1.16 预制桩复合地基 composite foundation with precast pile

采用机械打（压）入地基土中的预制钢筋混凝土桩形成竖向增强体的复合地基。

2.1.17 多向加芯搅拌桩复合地基 composite foundation with multi directional coring mixing pile

在多向水泥土搅拌桩中压入或灌注芯桩后形成的新型竖向增强体的复合地基。芯桩可由钢筋混凝土、素混凝土、型钢等各种劲性材料制成。

2.1.18 工后沉降 post-construction settlement

在上部设计荷载作用下，地基从路面竣工之日至路面设计使用年限内容许产生的沉降。

2.1.19 夯填度 tamping-filling degree

夯实后的褥垫层厚度与虚铺厚度的比值。

2.2 符 号

2.2.1 几何参数

A_p ——桩身截面面积；

b ——塑料排水板宽度；

d_p ——塑料排水板当量换算直径；

d_e ——竖井的有效排水直径；
 Δh_i ——第 i 层土的厚度；
 l_p ——桩长；
 l_i ——桩周第 i 层土的厚度；
 l ——竖井的间距；
 m ——复合地基桩体置换率；
 S ——地基沉降量；
 S_1 ——加固区土层压缩量；
 S_2 ——下卧土层压缩量；
 S_f ——最终竖向变形量；
 u_p ——桩身周长；
 δ ——塑料排水板厚度。

2.2.2 作用与作用效应、抗力、材料性能

d_s ——土粒相对密度；
 e_{0i} ——第 i 层中点土自重应力所对应的孔隙比；
 e_{1i} ——第 i 层中点土自重应力与附加应力之和所对应的孔隙比；
 E_{spi} ——第 i 层土的复合压缩模量；
 E_{pi} ——第 i 层桩体的压缩模量；
 E_{si} ——第 i 层土的压缩模量；
 E_p ——桩体压缩模量；
 E'_{si} ——第 i 层土处理后的压缩模量；
 f_{cu} ——对于水泥土搅拌桩、高压旋喷桩，其表示与桩身水泥土配比相同的室内加固土试块在标准养护条件下 28d 龄期的立方体抗压强度平均值；对于水泥粉煤灰碎石

桩（CFG 桩）、素混凝土桩、预制桩，其表示混合料或混凝土的轴心抗压强度设计值；

f_{sk} ——桩间地基土承载力特征值；

f_{spk} ——复合地基承载力特征值；

M_R ——抗滑力矩；

M_S ——滑动力矩；

q_{si} ——桩周第 i 层土的摩阻力特征值；

q_p ——桩端地基土承载力特征值；

Q ——CFG 桩、素混凝土桩、预制桩顶部附加荷载；

$\dot{q}_i$ ——第 i 级荷载的加载速率；

R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值；

$\bar{U}_t$ —— t 时间道路路基的平均固结度；

w_{op} ——填料的最优含水量；

τ_{ft} —— t 时刻，该点土的抗剪强度；

τ_{f0} ——地基土的天然抗剪强度；

ρ_{dmax} ——分层压实填土的最大干密度；

ρ_w ——水的密度；

φ_{cu} ——三轴固结不排水压缩试验求得的土的内摩擦角；

$\Sigma \Delta p$ ——各级荷载的累加值；

$\Delta \sigma_z$ ——预压荷载引起的该点的附加竖向应力；

Δp_i ——第 i 层土中点的附加应力。

2.2.3 计算系数

K ——稳定安全系数；

α ——桩端地基土承载力折减系数；

β ——桩间地基土承载力发挥系数；

ξ ——预压荷载下地基最终竖向变形量计算经验系数；
 η ——桩身强度折减系数；
 η' ——最大干密度计算经验系数；
 ψ_p ——桩身压缩经验系数；
 ψ_{s1} ——加固区沉降计算经验系数；
 ψ_{s2} ——下卧层沉降计算经验系数。



3 基本规定

3.0.1 城市道路软弱土地基处理的工后沉降（道路地基沉降与路堤沉降之和）宜满足表 3.0.1 的要求。工后沉降不能满足要求时，应对道路地基进行处理。

表 3.0.1 工后沉降表

道路等级/工程位置	桥台与路堤相邻处	涵洞、箱涵或通道处	一般路段
快速路、主干路	$\leq 0.10\text{m}$	$\leq 0.20\text{m}$	$\leq 0.20\text{m}$
次干路、支路	$\leq 0.20\text{m}$	$\leq 0.30\text{m}$	$\leq 0.40\text{m}$

3.0.2 城市道路软弱土地基处理方法应根据道路工程性质（新建、改建、扩建等）、道路等级、断面型式、路堤高度、荷载大小、地下管线分布、工程地质和环境条件、工期要求、施工工艺和地区经验等因素综合确定。

3.0.3 软弱土地基处理应满足市政工程总体要求，应统筹地基处理与道路、排水、桥梁、隧道等相关工程的建设时序，并综合考虑与市政公用设施、城市轨道交通等的关系。

3.0.4 桥台、涵洞、箱涵、通道与路堤相邻处应采取减小差异沉降的处理措施，并满足表 3.0.1 的要求。

3.0.5 多种地基处理方式组合使用时，相互之间应有可靠的搭接构造措施。

3.0.6 高压线、铁塔附近以及其他建（构）筑物附近空间狭小、净空受限，可采用换填、旋喷桩等进行地基处理，并采取相应的保护措施。

3.0.7 改扩建道路的帮宽范围应进行必要的地基处理，帮宽处根据需要采取必要的衔接措施。

3.0.8 道路路基压实度应满足表 3.0.8 的要求。

表 3.0.8 路基压实度要求表

项目分类	路床顶面以下 深度 (m)	压实度 (%)			
		快速路	主干路	次干路	支路
填方路基	0 ~ 0.8	96	95	94	93
	0.8 ~ 1.5	94	93	92	91
	> 1.5	93	92	91	90
零填及 挖方路基	0 ~ 0.3	96	95	94	93
	0.3 ~ 0.8	94	93	92	91

注：表中压实度对应的最大干密度均按照重型击实试验标准得到。

3.0.9 地基处理设计前应取得下列资料：

- 1 总平面图、项目红线图、场地地形图等；
- 2 场地岩土工程勘察报告；
- 3 管涵设计图、道路周边建（构）筑物及相邻地下工程情况等环境资料；
- 4 对于改建及扩建工程，原道路的路面变形、路基沉降、管涵分布等基本状况。

3.0.10 地基处理设计应包括下列内容：

- 1 地基处理方案比较和选型；
- 2 地基处理的附加应力计算；
- 3 地基处理桩体及复合地基的承载力计算、复合地基稳定性和变形计算；
- 4 环境影响因素分析及保护措施；

- 5 危险源辨识及应急措施；
 - 6 地基处理施工、检测检验及验收要求；
 - 7 路基监测与维护要求等。
- 3.0.11** 轨道交通、桥梁、堤防、高压线、综合管廊、铁路等保护范围内的地基处理工程，应评价地基处理工程对其的影响。
- 3.0.12** 地基处理工程应遵循“动态设计、信息化施工”的原则，在施工过程中根据检测及监测情况，对设计及施工进行动态调整。



4 工程勘察与环境调查

4.1 一般规定

4.1.1 地基处理工程勘察宜按不同的勘察阶段进行。勘察阶段主要分为可行性研究勘察阶段、初步勘察阶段及详细勘察阶段。

4.1.2 地基处理工程应与道路、排水等市政工程同步进行勘察。

4.1.3 地基处理工程勘察前，需详细了解设计意图、周边环境保护要求等，并应取得以下资料和信息：

- 1 附有现状地形的道路、排水设计总平面图；
- 2 现状地形、地貌、地下障碍物和可能采取的施工工法；
- 3 周边既有地上建（构）筑物、地下埋设物的分布情况。

4.1.4 施工过程中遇到详勘工作未能准确反映的复杂岩土工程问题，并可能影响地基处理工程质量与安全时，应开展施工勘察工作。

4.2 工程勘察

4.2.1 地基处理工程勘察应采用钻探取样、原位测试及室内试验等多种手段，对于淤泥、淤泥质土等软弱土层应采用静力触探、现场十字板剪切试验等方法查明其空间分布和土性特征；对于杂填土等软弱土层可采用坑探等方法查明其空间分布和土性特征。一级阶地或湖塘相沉积软弱土层的静力触探孔占地基处理工程勘探孔总数的比例不应小于 1/3。

4.2.2 勘探点的布置应符合《市政工程勘察规范》CJJ56 的有

关规定。道路走向转弯处、桥台与路堤相邻处、涵洞、箱涵或通道、挡墙处应布置勘探点，复杂地段可增加横断面；跨越不同地貌单元时，应分别在每个地貌单元布置勘探孔。

4.2.3 勘探孔深度应满足沉降计算及稳定性计算要求，应穿透淤泥和淤泥质土等不良土层；勘探深度内遇厚层坚硬黏性土、碎石土及岩层时可根据岩土类别及沉降计算要求适当减小勘探深度。

4.2.4 勘探孔施工完成后应及时采取有效措施进行回填封孔，并应符合《工程勘察钻探封孔技术规程》DB42/T 1710 的规定。

4.2.5 地基处理工程勘察成果应作为道路、排水工程勘察报告的必要组成部分。

4.3 环境调查

4.3.1 地基处理环境调查范围应为地基处理范围及其影响范围，对邻近存在铁路、轨道交通、桥梁、堤防、隧道、铁塔、综合管廊、燃气等需要进行保护对象的地基处理工程，应进行专项环境调查。

4.3.2 地基处理环境调查，应包括以下内容：

1 调查收集地基处理范围及其影响范围内的建（构）筑物分布、层数、结构类型、基础形式、埋置深度、使用年限、结构完好程度等相关资料；根据需要建设单位可委托专业机构对地基处理影响范围内的建（构）筑物进行现状鉴定；

2 调查地基处理范围及其影响范围内的各种地下管线（包括给排水、电力、电讯、燃气等）、地下工程设施（地铁隧道、通道、车站）及地下人防工程的位置及其规模、埋置深度、结构

类型和构筑年代等；

3 调查地基处理范围及其影响范围内的地上架空线、高压电线等设施悬高、电压、权属单位等；

4 调查地基处理范围及其影响范围内的地上桥梁等设施净空、基础型式及埋深、权属单位等；

5 调查可能影响地基稳定性的不良地质作用；

6 调查可能对地基处理设计及施工有其他环境因素。



5 沉降与稳定计算

5.1 一般规定

5.1.1 软弱土地基的沉降与稳定性应根据软弱土层的空间分布、物理力学性质、路堤高度、道路等级以及周边环境等因素分段计算。

5.1.2 软弱土地基沉降计算的深度应计算至最下层厚度 1.0m 的土层变形值与总变形值之比不大于 0.025 处。

5.1.3 稳定性计算应分路堤施工期及道路运营期两种工况。路堤施工期荷载可仅考虑路堤自重及施工荷载；运营期荷载应包括路堤自重、路面的增重及行车荷载。地震力计算可仅考虑水平向地震力。

5.1.4 稳定性计算时行车荷载可按静止的土柱作用考虑。换算土柱高度可按车辆荷载均布于车辆投影面积上换算得出，土柱位置应选择在路堤上车辆荷载最不利的的作用位置。

5.1.5 路基预压或超填时，沉降与稳定计算应包含预压高度或超填高度。

5.2 沉降计算

5.2.1 地基沉降由加固区土层压缩量和下卧土层压缩量组成，可按下式计算：

$$S = S_1 + S_2 \quad (5.2.1)$$

式中：S——地基沉降量（mm）；

S_1 ——加固区土层压缩量（mm）；

S_2 ——下卧土层压缩量（mm）。

5.2.2 加固区土层在计算荷载下的压缩量，根据软弱土地基处

理的方法，可采用下列计算方法：

1 采用水泥土搅拌桩、高压旋喷桩处理形成的复合地基，可按下列公式计算：

$$S_1 = \psi_{s1} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_{spi}} \Delta h_i \quad (5.2.2-1)$$

$$E_{spi} = mE_{pi} + (1 - m) E_{si} \quad (5.2.2-2)$$

式中： S_1 ——加固区土层压缩量（mm）；

ψ_{s1} ——加固区沉降计算经验系数，根据地区经验取值，无经验时按照《建筑地基基础设计规范》GB 50007 取值；

Δp_i ——第 i 层土中点的附加应力（kPa）；

Δh_i ——第 i 层土的厚度（m）；

E_{spi} ——第 i 层土的复合压缩模量（MPa）；

m ——复合地基桩体置换率；

E_{pi} ——第 i 层桩体的压缩模量（MPa）；

E_{si} ——第 i 层土的压缩模量（MPa）。

2 水泥粉煤灰碎石桩、素混凝土桩、预制桩处理的复合地基，可按下列公式计算：

$$S_1 = \psi_p \frac{Q l_p}{E_p A_p} \quad (5.2.2-3)$$

式中： ψ_p ——桩身压缩经验系数，根据桩体的长径比、桩端土层情况结合地区经验取值；

Q ——CFG 桩、素混凝土桩、预制桩顶部附加荷载（kN）；

l_p ——桩长（m）；

E_p ——桩体压缩模量（MPa）；

A_p ——桩身截面面积（m²）。

3 采用换填、压实、夯实、预压方法处理的地基，可按下列公式计算：

$$S_1 = \psi_{s1} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E'_{si}} \Delta h_i \quad (5.2.2-4)$$

式中： S_1 ——加固区土层压缩量（mm）；

ψ_{s1} ——加固区沉降计算经验系数，根据地区经验取值，无经验时按照《建筑地基基础设计规范》GB 50007 取值；

Δp_i ——第 i 层土中点的附加应力（kPa）；

Δh_i ——第 i 层土的厚度（m）；

E'_{si} ——第 i 层土处理后的压缩模量（MPa）。

5.2.3 下卧土层的压缩量，可按下列公式计算：

$$S_2 = \psi_{s2} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_{si}} \Delta h_i \quad (5.2.3)$$

式中： S_2 ——下卧土层压缩量（mm）；

ψ_{s2} ——下卧层沉降计算经验系数，根据地区经验取值，无经验时按照《建筑地基基础设计规范》GB 50007 取值；

Δp_i ——第 i 层土中点的附加应力（kPa）；

Δh_i ——第 i 层土的厚度（m）；

E_{si} ——第 i 层土的压缩模量（MPa）。

5.3 稳定性分析

5.3.1 地基稳定性应根据可能的破坏模式和工况进行分析与计算。

5.3.2 地基稳定性分析方法、计算参数选取、参数的试验方法与取值以及稳定安全系数取值应相互匹配。

5.3.3 均质地基稳定性分析可采用圆弧滑动法，稳定安全系数可按下列公式计算：

$$K = \frac{M_R}{M_S} \quad (5.3.3)$$

式中： K ——稳定安全系数；

M_R ——抗滑力矩（ $\text{kN} \cdot \text{m}$ ）；

M_S ——滑动力矩（ $\text{kN} \cdot \text{m}$ ）。

5.3.4 桩体复合地基稳定性计算应考虑桩体的增强作用；道路附近存在渠道、地下室等导致道路软弱地基具有临空面时，地基稳定性不仅应满足公式（5.3.3），尚应有防止流塑、软塑等软弱土层流动的构造措施。

5.4 桩体复合地基承载力计算

5.4.1 桩体复合地基的单桩竖向承载力特征值宜通过现场载荷试验确定，设计时可按下列公式计算，并取其较小值：

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (5.4.1-1)$$

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (5.4.1-2)$$

式中： R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值（ kN ）。

η ——桩身强度折减系数，水泥土搅拌桩、高压旋喷桩可取 0.20 ~ 0.25；CFG 桩、素混凝土桩可取 0.6 ~ 0.8；预制桩可取 0.55 ~ 0.65。

f_{cu} ——对于水泥土搅拌桩、高压旋喷桩，其表示与桩身水泥土配比相同的室内加固土试块（边长为 70.7mm 的立方体，也可采用边长为 50mm 的立方体）在标准养护条件下 28d 龄期的立方体抗压强度平均值

(kPa); 对于 CFG 桩、素混凝土桩、预制桩, 其表示混合料或混凝土的轴心抗压强度设计值 (kPa), 按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB50010 取值。

A_p ——桩身截面面积 (m^2)。

u_p ——桩身周长 (m)。

q_{si} ——桩周第 i 层土的摩阻力特征值 (kPa)。

l_i ——桩周第 i 层土的厚度 (m)。

α ——桩端地基土承载力特征值折减系数, 水泥土搅拌桩、高压旋喷桩可取 0.4 ~ 0.6; CFG 桩、素混凝土桩、预制桩可取 1.0。

q_p ——桩端地基土承载力特征值 (kPa)。

5.4.2 桩体复合地基竖向承载力特征值宜通过现场单桩或多桩复合地基载荷试验确定, 设计时可按下列公式计算:

$$f_{\text{spk}} = \frac{mR_a}{A_p} + \beta (1 - m) f_{\text{sk}} \quad (5.4.2)$$

式中: f_{spk} ——复合地基承载力特征值 (kN);

A_p ——桩身截面面积 (m^2);

β ——桩间地基土承载力发挥系数, 可按地区经验取值;

m ——复合地基桩体置换率;

f_{sk} ——桩间地基土承载力特征值 (kPa) [其值宜通过现场试验确定, 主要与桩型、施工方式、桩间地基土的软弱程度、厚度及其空间分布有关, 对于较厚的淤泥及淤泥质土, 且分布接近桩顶, 则可取 40kPa ~ 60kPa; 对于不太厚的淤泥及淤泥质土, 或桩顶以下分布有一定厚度的相对硬壳层, 则可取 50kPa ~ 80kPa]。

6 换填垫层与压实地基

6.1 一般规定

6.1.1 对于浅层软弱土层、不均匀土层或对沉降要求不高的地基，可采用换填垫层或压实地基进行处理。

6.1.2 换填垫层处理应根据道路等级、断面型式、荷载性质、场地土质条件、周边环境、施工机械设备及填料来源和性质等因素综合分析并合理设计；应结合所选用的施工机械、换填材料及场地土质条件等进行现场试验，明确换填垫层压实效果和施工质量控制标准。

6.1.3 换填垫层可采用碎石土、砂砾土、石屑、矿渣、灰土、粉煤灰、水泥土和加筋土等。

6.1.4 压实地基处理应符合下列规定：

1 地下水位以上填土，可采用碾压法和振动压实法，非黏性土或黏粒含量少、透水性较好的松散填土地基宜采用振动压实法。

2 应通过现场试验确定压实地基处理效果，现场试验应综合考虑道路等级、变形要求、断面型式、场地土层性质及填料等因素。

3 应根据道路等级、断面型式、荷载性质、填料性能和现场条件等因素对压实填土提出质量要求，未经检验或不符合质量要求的压实填土，不得作为道路地基持力层。

6.1.5 冲击（振动）压实设计与施工应根据场地的地形地貌、土质条件等因素，结合冲击（振动）压实的适用范围综合确定。

冲击（振动）压实应考虑对临近居民、建（构）筑物、地下管线等周边环境的不利影响，根据需要可预留安全距离或采取减振措施。

6.1.6 冲击（振动）压实应选取代表性场地进行工艺性试验，明确其适用性、施工工艺和施工参数等。

6.2 设 计

6.2.1 换填垫层的厚度应根据置换软弱土层的深度、道路沉降以及道路边坡稳定性确定，厚度一般不超过 3.0m；垫层宽度宜超过道路边坡坡脚以外 1.0m。

6.2.2 换填垫层的承载力宜通过现场载荷试验确定，换填垫层顶面的压实度要求应不低于相同层次的路堤填料压实度要求。

6.2.3 换填垫层材料应符合下列要求：

1 砂石。宜选用级配良好的碎石、角砾、圆砾、砾砂、粗砂、中砂或石屑，不应含有植物残体、垃圾等杂质，砂石的最大粒径不宜大于 50mm。

2 粉质黏土。土料中有机质含量不得超过 5%，不得含有冻土或膨胀土；含有碎石时，其最大粒径不宜大于 50mm。

3 灰土。石灰与土的体积配合比宜为 2：8 或 3：7；石灰宜选用新鲜的消石灰，其最大粒径不得大于 5mm，土料宜选用粉质黏土。

6.2.4 碎石垫层兼有排水作用，其厚度不应小于 0.3m，且应满足地基固结所需要的排水功能要求。

6.2.5 灰土垫层石灰的掺合量和水泥土垫层水泥的掺合量宜通过现场试验确定。

6.2.6 压实填土的填料应符合下列规定：

1 填料可选用粉质黏土、灰土、级配良好的砂土或碎石土，以及质地坚硬、性能稳定、无腐蚀性和无放射性危害的工业废料等。

2 以碎石土作填料时，其最大粒径不宜大于 100mm。

3 不得使用淤泥、耕土、冻土、膨胀土以及有机质含量大于 5% 的土料。

6.2.7 应根据压实机械的压实性能、地基土和填料的物理力学性质，结合现场试验确定碾压分层厚度、碾压遍数、碾压范围和有效处理深度等施工参数。压实填土的质量以压实度控制，并应根据道路等级和压实填土所在部位的要求确定。

6.2.8 压实填土的最大干密度和最优含水量，宜通过击实试验确定，无试验资料时，最大干密度可按下列公式计算：

$$\rho_{dmax} = \eta' \frac{\rho_w d_s}{1 + 0.01 w_{op} d_s} \quad (6.2.8)$$

式中： ρ_{dmax} ——分层压实填土的最大干密度（ g/cm^3 ）；

η' ——经验系数，粉质粘土取 0.96，粉土取 0.97；

ρ_w ——水的密度（ g/cm^3 ）；

d_s ——土粒相对密度；

w_{op} ——填料的最优含水量（%）。

填料为碎石或卵石时，其最大干密度可取 $2.1 \sim 2.2 \text{g}/\text{cm}^3$ 。

6.2.9 压实填土处理范围应大于道路路基范围，且超出路基边缘以外不小于 1.0m。

6.2.10 压实填土地基承载力特征值，应通过现场静载荷试验确定；或通过动力触探、静力触探等试验并结合静载荷试验综合确定。

6.2.11 压实填土处理后的地基稳定性与沉降应按本规程第5章的有关规定计算。

6.3 施 工

6.3.1 垫层施工应根据不同的换填材料选择施工机械。黏土、灰土宜采用平碾、振动碾或羊足碾；中小型工程也可以采用蛙式夯、柴油夯；砂石等宜采用振动碾；粉煤灰宜采用平碾、振动碾、平板振动器。

6.3.2 垫层的施工方法、分层铺筑厚度、每层压实遍数等应通过现场试验确定；宜采用垫层材料的最优含水量作为施工控制含水量。

6.3.3 换填垫层施工应加强排水措施，不得在浸水条件下施工。

6.3.4 垫层底面宜在同一标高；标高不同的垫层底面宜挖成阶梯形搭接，并按先深后浅的顺序进行垫层施工。

6.3.5 铺设土工合成材料时下铺地基土层顶面应平整。铺设时应把土工合成材料张拉平直、绷紧；端头应固定或回折锚固；连接宜用搭接法、缝接法和胶结法，并均应保证主要受力方向的连接强度不低于所采用材料的抗拉强度。

6.3.6 不同的填料宜水平分层，分段填筑，分段施工接缝处应夯实。

6.3.7 在透水性差的压实层上填筑透水性填料前，应在其表面设置2%~4%的双向横坡。

6.3.8 每一填筑层压实后的宽度不得小于设计宽度。

6.3.9 路堤填筑时，应从最低处分层填筑，逐层压实；严禁扰动垫层下的软弱土层。

6.4 质量控制与检测

6.4.1 换填垫层与压实地基的质量检测应符合下列规定：

1 应进行分层压实度检测和地基承载力检测。每填筑一层，应检测该层的压实度，符合要求后方可填筑上一层。

2 对粉质黏土、灰土、水泥土，其压实度可采用环刀法；对于砂土、碎石土，可采用灌水法或灌砂法。对粉质黏土、灰土、水泥土和砂石垫层的施工质量也可采用静力触探、轻型动力触探或标准贯入试验检测，砂石垫层还可采用重型动力触探检测。采用触探、贯入法时应通过现场试验分析、确认设计要求的压实度所对应的贯入度，并以此作为控制标准。

3 检测点的数量，对大面积处理每 $50\text{m}^2 \sim 100\text{m}^2$ 不应少于 1 个点；对基槽每 $10\text{m} \sim 20\text{m}$ 不应少于 1 个点。

4 竣工验收采用载荷试验检测垫层承载力时，每个单位工程不宜少于 3 个点。

5 加筋土施工前应对筋材进行力学性能检测；施工过程中宜监测筋材的内拉应力、加筋土的水平位移及竖向沉降等。

6.4.2 换填垫层与压实地基每完成一道工序应按设计要求进行验收，未经验收或验收不合格时，不得进行下一道工序施工。

7 夯实地基

7.1 一般规定

7.1.1 夯实地基可分为强夯和强夯置换地基。对于碎石土、砂土、低饱和度的粉土与黏性土、素填土和杂填土等地基，可采用强夯进行地基处理；对于饱和度高的粉土与软塑-流塑的黏性土、素填土和杂填土等地基，可采用强夯置换进行地基处理。

7.1.2 强夯及强夯置换施工前，应结合工程特性、工程地质条件和设备选型等因素选择有代表性的地段进行工艺性试验，明确施工工艺和参数，验证地基处理效果。

7.1.3 场地附近分布有建（构）筑物、地下管线等复杂环境，不宜采用强夯及强夯置换进行地基处理。

7.1.4 场地地下水位较高，可能影响强夯及强夯置换效果时可采取降排水等措施。

7.2 设计

7.2.1 强夯夯击点及强夯置墩桩宜按正三角形或正方形布置。

7.2.2 强夯的有效加固深度，应根据现场试夯或地区经验确定。缺少试验资料或经验时，可按表 7.2.2 进行预估。

表 7.2.2 强夯的有效加固深度（m）

单击夯击能 $E/(\text{kN} \cdot \text{m})$	碎石土、砂土等粗颗粒土	粉土、粉质黏土等细颗粒土
1000	4.0 ~ 5.0	3.0 ~ 4.0
2000	5.0 ~ 6.0	4.0 ~ 5.0

续表 7.2.2

单击夯击能 $E/(\text{kN} \cdot \text{m})$	碎石土、砂土等粗颗粒土	粉土、粉质黏土等细颗粒土
3000	6.0 ~ 7.0	5.0 ~ 6.0
4000	7.0 ~ 8.0	6.0 ~ 7.0
5000	8.0 ~ 8.5	7.0 ~ 7.5
6000	8.5 ~ 9.0	7.5 ~ 8.0
8000	9.0 ~ 9.5	8.0 ~ 8.5
10000	9.5 ~ 10.0	8.5 ~ 9.0
12000	10.0 ~ 11.0	9.0 ~ 10.0

注：强夯法的有效加固深度应从最初起夯面算起；单击夯击能 E 大于 $12000\text{kN} \cdot \text{m}$ 时，强夯的有效加固深度应通过试验确定。

7.2.3 夯点的夯击次数，应按现场试夯得到的夯击次数和夯沉量关系曲线确定，并符合下列规定：

1 最后两击的平均夯沉量宜满足表 7.2.3 的要求，当单击夯击能大于 $12000\text{kN} \cdot \text{m}$ 时，应通过试验确定。

表 7.2.3 强夯法最后两击平均夯沉量 (mm)

单击夯击能 $E/(\text{kN} \cdot \text{m})$	最后两击平均夯沉量
$E < 4000$	≤ 50
$4000 \leq E < 6000$	≤ 100
$6000 \leq E < 8000$	≤ 150
$8000 \leq E < 12000$	≤ 200

2 夯坑周围地面不应发生过大的隆起。

3 不应出现夯坑过深而提锤困难的现象。

7.2.4 强夯夯击遍数应根据地基土的性质确定，可采用点夯 2~4 遍，渗透性较差的细颗粒土夯击遍数可适当增加。最后再低

能量满夯 2~3 遍，满夯可采用轻锤或低落距锤多次夯击。

7.2.5 强夯两遍夯击之间宜有一定的间隔时间，间隔时间取决于土中超静孔隙水压力的消散速度。缺少实测资料时，可根据地基土的渗透性确定，对于渗透性差的黏性土地基，间隔时间不应小于 2 周，对于渗透性好的地基可连续夯击。

7.2.6 强夯第一遍夯击点间距可取夯锤直径的 2.5~3.5 倍，第二遍夯击点应位于第一遍夯击点之间，以后各遍夯击点间距可适当减小。对处理深度较深或单击夯击能较大的工程，第一遍夯击点间距宜适当增大。

7.2.7 强夯地基承载力可根据夯后静力触探、标准贯入、动力触探试验或土工试验确定，也可通过现场载荷试验确定。

7.2.8 强夯置换墩的深度应穿透软土层，到达相对硬土层。

7.2.9 强夯置换的单击夯击能应根据现场试验确定。

7.2.10 强夯置换墩体材料应采用级配良好的块石、碎石、矿渣等坚硬粗颗粒材料，粒径大于 300mm 的颗粒含量不宜超过总质量的 30%。

7.2.11 强夯置换夯点的夯击次数应通过现场试夯确定，最后两击的平均夯沉量应符合本规程第 7.2.3 条要求。

7.2.12 强夯置换墩的中心间距应根据道路等级和地基土的性质确定，满堂布置时可取夯锤直径的 2~3 倍，强夯置换墩的计算直径可取夯锤直径的 1.1~1.2 倍。

7.2.13 强夯置换设计应预估地面抬高值，并在试夯时校正。

7.3 施 工

7.3.1 夯实设备应能满足设计与技术要求，保证施工质量和效率。

7.3.2 应根据设计与规范要求进行夯实试验，获得有效加固深度、单击夯击能、夯点的布置及间距、夯击遍数等技术参数，用来指导现场施工。

7.3.3 施工时应清理杂物及障碍物，平整场地，做好场地排水。

7.3.4 夯实施工前应检查夯锤重和落距；每遍夯击前应复核夯点，夯完后检查夯坑位置，发现偏差及时纠正。按设计要求检查每个夯点的夯击次数、每击的夯沉量、最后两击的平均夯沉量和总夯沉量、夯点施工起止时间。

7.3.5 夯实施工引起的振动和侧向挤压对邻近建（构）筑物可能产生不利影响时，应设置监测点，并采取隔振沟等隔振或减振措施。

7.4 质量控制与检测

7.4.1 夯实地基质量检测应包括地基承载力和有效加固深度；可采用标准贯入试验或动力触探试验、静力触探试验、平板载荷试验等方法进行检测。

7.4.2 夯实处理后的地基竣工验收，地基承载力检测应采用静载荷试验、其他原位测试和室内土工试验综合确定；静载荷试验可采用现场大尺寸压板载荷试验，其他原位测试可采用标准贯入试验或动力触探等方法。强夯置换地基竣工验收，应采用单墩静载荷试验进行承载力检测，宜采用钻探、动力触探、地质雷达等方法查明置换墩着底及密度随深度变化情况等。

7.4.3 夯实地基检测点的数量每 300m^2 应不少于 1 个检测点，且单项工程不少于 3 点。强夯置换地基，置换墩检测数量不应少于墩点数的 3%，且不少于 3 点。

8 预压地基

8.1 一般规定

8.1.1 对于淤泥、淤泥质土、冲填土、黏性土等地基，可采用预压地基进行处理。预压地基按处理工艺可分为堆载预压、真空预压、真空-堆载联合预压。

8.1.2 对缺乏经验的地区，应在现场选择试验区进行预压试验。

8.1.3 预压地基加固应考虑预压对相邻建（构）筑物、地下管线等产生附加沉降的影响。真空预压及真空-堆载联合预压地基加固区边线与相邻建（构）筑物、地下管线等的距离不宜小于20m；距离较近时应采取相应保护措施。

8.2 设 计

I 堆载预压

8.2.1 堆载预压宜设置塑料排水板或砂井等排水竖井；软弱土层厚度较小且固结速率能满足要求时，可不设置排水竖井。加固面积较大时应分区加固。

8.2.2 堆载预压地基处理设计应包括下列内容：

- 1 塑料排水板或砂井的尺寸、间距、排列方式和深度；
- 2 预压范围、预压荷载、荷载分级、加载速率和预压时间；
- 3 堆载荷载作用下地基土的固结度、强度增长、稳定性和变形；

4 道路管线施工和道路路面施工的沉降控制标准。

8.2.3 排水竖井分普通砂井、袋装砂井和塑料排水板。普通砂井直径宜为 300mm ~ 500mm，袋装砂井直径宜为 70mm ~ 120mm。塑料排水板的当量换算直径可按下列公式计算：

$$d_p = \frac{2(b + \delta)}{\pi} \quad (8.2.3)$$

式中： d_p ——塑料排水板当量换算直径（mm）；

b ——塑料排水板宽度（mm）；

δ ——塑料排水板厚度（mm）。

8.2.4 排水竖井平面布置可采用等边三角形或正方形排列；竖井的有效排水直径可按下列公式计算：

1 等边三角形排列

$$d_e = 1.05l \quad (8.2.4-1)$$

2 正方形排列

$$d_e = 1.13l \quad (8.2.4-2)$$

式中： d_e ——竖井的有效排水直径；

l ——竖井的间距。

8.2.5 排水竖井的间距可根据地基土的固结特性和预压时间内所要求达到的固结度确定。设计时，竖井的间距可按井径比 n 选用（ $n = d_e/d_w$ ， d_w 为竖井直径，对塑料排水板可取 $d_w = d_p$ ）。塑料排水板或袋装砂井的间距可按 $n = 15 \sim 22$ 选用，普通砂井的间距可按 $n = 6 \sim 8$ 选用。

8.2.6 排水竖井的深度应根据道路地基的稳定性、变形和工期要求确定；竖井宜穿透淤泥、淤泥质土等软弱土层。

8.2.7 一级或多级等速加载条件下，固结时间为 t 时，对应总荷载的道路路基平均固结度可按下列公式计算：

$$\bar{U}_t = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} \left[(T_i - T_{i-1}) - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} (e^{-\beta T_i} - e^{-\beta T_{i-1}}) \right] \quad (8.2.7)$$

式中： $\bar{U}_t$ —— t 时间道路路基的平均固结度；

$\dot{q}_i$ ——第 i 级荷载的加载速率 (kPa/d)；

$\sum \Delta p$ ——各级荷载的累加值 (kPa)；

T_{i-1} , T_i ——分别为第 i 级荷载加载的起始和终止时间 (从零点起算) (d)，当计算第 i 级荷载加载过程中某时间 t 的固结度时， T_i 改为 t ；

α 、 β ——参数，根据路基土排水固结条件按表 8.2.7 采用。

对竖井地基，表中所列 β 为不考虑涂抹和井阻影响的参数值。

表 8.2.7 α 和 β 值

排水固结条件	竖向排水固结	向内径向排水固结	竖向和向内径向排水固结 (竖井穿透受压土层)	说明
参数	$\bar{U}_z > 30\%$			
α	$\frac{8}{\pi^2}$	1	$\frac{8}{\pi^2}$	$F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$
β	$\frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$	$\frac{8 C_h}{F_n d_e^2} d_e$	$\frac{8 C_h}{F_n d_e^2} d_e + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$	C_h ——土的径向排水固结系数 (cm ² /s)； C_v ——土的竖向排水固结系数 (cm ² /s)； H ——土层竖向排水距离 (cm)； $\bar{U}_z$ ——双面排水土层或固结应力均匀分布的单面排水土层平均固结度。

8.2.8 一级或多级等速加荷条件下，考虑涂抹和井阻影响时竖井穿透受压土层的平均固结度可按公式（8.2.7）计算，其中， $\alpha = \frac{8}{\pi^2}$ ， $\beta = \frac{8C_h}{Fd_e^2} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$ ， F 值按《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 的有关规定计算。

8.2.9 排水竖井未穿透受压土层时，竖井范围内土层的平均固结度和竖井底面以下受压土层的平均固结度，以及通过预压完成的变形量均应满足设计要求。

8.2.10 预压荷载应根据设计要求确定。超载预压法处理时超载量应根据预压时间内要求完成的变形量通过计算确定；加载速率应根据地基的强度增长和稳定性确定，当天然地基满足预压荷载下路基的稳定性要求时，可一次性加载；如不满足应分级加载，待前期预压荷载下地基的强度增长满足下一级荷载下地基的稳定性要求时，方可加载。

8.2.11 计算预压荷载下饱和黏性土地基中某点的抗剪强度时，应考虑土体原来的固结状态。对正常固结饱和黏性土地基，某点某一时间的抗剪强度可按下列公式计算：

$$\tau_{ft} = \tau_{f0} + \Delta\sigma_z \cdot U_t \tan \varphi_{cu} \quad (8.2.11)$$

式中： τ_{ft} —— t 时刻，该点土的抗剪强度（kPa）；

τ_{f0} ——地基土的天然抗剪强度（kPa）；

$\Delta\sigma_z$ ——预压荷载引起的该点的竖向附加应力（kPa）；

U_t ——该点土的固结度；

φ_{cu} ——三轴固结不排水压缩试验求得的土的内摩擦角（°）。

8.2.12 预压荷载下地基最终竖向变形量的计算可取附加应力与土自重应力的比值为 0.1 的深度作为压缩层的计算深度，可按下列公式计算：

$$S_f = \xi \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} \Delta h_i \quad (8.2.12)$$

式中： S_f ——最终竖向变形量（m）；

e_{0i} ——第*i*层中点土自重应力所对应的孔隙比，由室内固结试验 e-p 曲线查得；

e_{1i} ——第*i*层中点土自重应力与附加应力之和所对应的孔隙比，由室内固结试验 e-p 曲线查得；

Δh_i ——第*i*层土的厚度（m）；

ξ ——经验系数，可按地区经验确定。无经验时对正常固结和黏性土地基可取 $\xi = 1.1 \sim 1.4$ ；荷载较大或地基软弱土层厚度较大时应取较大值。

8.2.13 预压处理地基应在地表铺设与排水竖井相连的砂垫层，砂垫层厚度不应小于 500mm，砂垫层宜采用中粗砂，黏粒含量不应大于 3%；砂垫层的干密度应大于 1.5g/cm^3 ，渗透系数应大于 $1 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ 。

8.2.14 在预压区边缘应设置排水沟；在预压区内宜设置与砂垫层相连的排水盲沟，排水盲沟的间距不宜大于 20m。

8.2.15 堆载预压处理地基设计的平均固结度不宜低于 90%，应在现场监测的沉降速率明显变缓时方可卸载。

8.2.16 在堆载预压加载过程中，应满足地基承载力和稳定控制要求，并应进行竖向变形、水平位移及孔隙水压力的监测。堆载预压加载速率应满足下列要求：路堤中心最大竖向沉降速率不大于 10mm/d，预压边缘处最大水平位移速率不大于 5mm/d。

II 真空预压

8.2.17 真空预压处理地基应设置排水竖井，其设计应包括下列

内容：

- 1 竖井尺寸、间距、排列方式和深度；
 - 2 预压区面积和分块大小；
 - 3 真空预压施工工艺；
 - 4 要求达到的真空度和土层的固结度；
 - 5 真空预压和路基荷载下地基的变形计算；
 - 6 真空预压后的地基承载力增长计算；
 - 7 施工监控和检测要求。
- 8.2.18** 排水竖井的间距可按本规程第 8.2.5 条确定。
- 8.2.19** 砂井的砂料应选用中粗砂，其渗透系数应大于 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 。
- 8.2.20** 真空预压竖向排水通道宜穿透软土层，但不应进入下卧透水层。当软土层较厚、且以地基稳定性控制的工程，竖向排水通道的深度不应小于最危险滑动面以下 3.0m；对以变形控制的工程，竖井深度应根据在限定的预压时间内需完成的变形量确定，且宜穿透主要受压土层。
- 8.2.21** 密封膜宜采用 2~3 层聚乙烯或聚氯乙烯薄膜。单层密封膜的技术要求应符合表 8.2.21 的要求。

表 8.2.21 单层密封膜的技术

最小抗拉强度/MPa		最小断裂 伸长率/%	最小直角撕裂 强度/(kN/m)	厚度/mm
纵向	横向			
18.5	16.5	220	40	0.12~0.16

- 8.2.22** 真空预压膜下真空度应稳定在 86.7kPa（650mmHg）以上，且应均匀分布，排水竖井深度范围内土层的平均固结度应大于 90%。
- 8.2.23** 对于表层存在良好透气层或处理范围内有充足水源补给

透水层，应采取有效措施隔断透气层或透水层。密封措施宜采用黏土密封墙，黏土密封墙厚度不宜小于 1.2m，渗透系数应小于 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 。

8.2.24 真空预压固结度和地基强度增长可按本规程第 8.2.7、8.2.11 条计算。

8.2.25 真空预压地基最终竖向变形可按本规程第 8.2.12 条计算。 ξ 可按当地经验取值，无当地经验时， ξ 可取 1.0 ~ 1.3。

8.2.26 真空预压地基加固面积较大时，宜分区加固，每块预压面积尽可能大且呈方形，分区面积宜为 $10000\text{m}^2 \sim 30000\text{m}^2$ 。

8.2.27 真空预压地基加固可根据加固面积大小、形状和土层特性，按每套设备可加固地基 $1000\text{m}^2 \sim 1500\text{m}^2$ 确定设备数量。

8.2.28 真空预压膜下真空度应满足设计要求，预压时间不宜低于 90d。

8.2.29 真空预压应分级加载，分级数应根据地基土稳定计算确定。预压加载速率应满足下列要求：路堤中心最大竖向沉降速率不大于 10mm/d，预压边缘处最大水平位移速率不大于 5mm/d。

III 真空-堆载联合预压

8.2.30 对于一般软黏土，上部堆载宜在真空预压膜下真空度稳定地达到 86.7kPa (650mmHg) 且抽真空不少于 10d 后进行。对于淤泥及淤泥质土，上部堆载宜在真空预压膜下真空度稳定地达到 86.7kPa (650mmHg) 且抽真空不少于 20d 后进行。

8.2.31 真空-堆载联合预压固结度和地基强度增长可按本规程第 8.2.7、8.2.11 条计算。

8.2.32 真空-堆载联合预压最终竖向变形可按本规程第 8.2.12

条计算， ξ 可按当地经验取值，无当地经验时， ξ 可取 1.0 ~ 1.3。

8.2.33 堆载较大时，真空-堆载联合预压应分级加载，分级数应根据地基稳定计算确定。分级加载时，待前期预压荷载下地基土的强度增长满足下一级荷载下地基的稳定性要求时，方可加载。预压加载速率应满足下列要求：路堤中心最大竖向沉降速率不大于 10mm/d，预压边缘处最大水平位移速率不大于 5mm/d。

8.3 施 工

I 堆载预压

8.3.1 塑料排水板的性能指标应满足设计要求，现场妥善保管，防止破损或污染；破损或污染的塑料排水板不得使用。

8.3.2 砂井实际灌砂量不得小于计算值的 95%；灌入砂袋中的砂宜用干砂，并应密实；袋装砂井施工所用套管内径应大于砂井直径。

8.3.3 塑料排水板和袋装砂井施工时，宜配备深度检测设备。

8.3.4 塑料排水板需接长时，应采用滤膜内芯搭接的连接方法，搭接长度宜大于 200mm。

8.3.5 塑料排水板和袋装砂井施工时，垂直度允许偏差应为 $\pm 1.5\%$ ，深度应满足设计要求；袋装砂井的平面井距偏差不应大于井的直径。

8.3.6 塑料排水板和袋装砂井砂袋埋入砂垫层中的长度不应小于 500mm。

II 真空预压

8.3.7 真空预压抽气设备宜采用射流真空泵，真空泵空抽吸力

不应低于 95kPa。真空泵的设置应根据地基预压面积、形状、真空泵效率和工程经验确定，每块预压区设置的真空泵不应少于两台。

8.3.8 真空管路设置应符合下列规定：

- 1 真空管路的连接应密封，真空管路应设置止回阀和截门；
- 2 水平向分布的滤水管可采用条状、梳齿状及羽毛状等形式，滤水管布置宜形成回路；
- 3 滤水管应设置在砂垫层中，上覆砂层厚度宜不小于 200mm；
- 4 滤水管可采用钢管或塑料管，应外包尼龙纱或土工织物等滤水材料。

8.3.9 密封膜应采用抗穿刺性能强、抗老化、韧性好的不透气材料；密封膜铺设不宜少于两层，其周边可采用挖沟埋膜、膜上覆水等方法进行密封；密封膜宜采用双热合缝平搭接，搭接宽度应大于 15mm。

III 真空-堆载联合预压

8.3.10 真空-堆载联合预压，应先抽真空，当真空压力达到设计要求并稳定后，再进行堆载，并持续抽真空。

8.3.11 堆载前，应在密封膜上铺设编织布或无纺布等土工织物保护层；保护层上铺设级配砂垫层，厚度不宜小于 200mm。

8.3.12 堆载施工可采用轻型运输工具，不得损坏密封膜。

8.3.13 堆载施工应适时监测密封膜下真空度，发现漏气应及时处理。

8.4 质量控制与检测

8.4.1 施工过程中的质量检测应包括以下内容：

- 1 塑料排水板应在现场随机抽样送实验室进行性能指标检

测，其性能指标包括纵向通水量、复合体抗拉强度、滤膜抗拉强度、滤膜渗透系数和等效孔径等。

2 砂井和砂垫层的砂料，应取样进行颗粒分析和渗透性试验。

3 以滑动稳定性控制的高填方道路，应在预压区内选择代表性部位预留孔位，在加载不同阶段进行原位十字板剪切试验和取土进行室内土工试验。

4 真空预压加固地基除以上检测外，尚应监测密封膜下真空度，并应在真空预压加固区边缘处设置测斜监测孔。

5 真空-堆载联合预压工程，原位监测项目还应包括地下水位。

8.4.2 检测项目应符合下列要求：

1 真空测头可采用小型过滤管制作，用软塑料管将其与密封膜外真空压力表连接，测头应合理布置，每 $1000\text{m}^2 \sim 2000\text{m}^2$ 设置 1 个。密封膜下真空度观测初期每 2h 观测 1 次，稳定后每 4h 观测 1 次，真空卸载期间每 2h 观测 1 次。

2 地面沉降观测点不应少于 3 个，沉降标的位置应保证铺设密封膜前后相对应，铺膜前每 2d 观测一次，抽真空初期每天观测 1 次，膜下真空度稳定后每 2d 观测 1 次。

8.4.3 预压地基竣工验收应符合下列规定：

1 竖向排水体处理深度范围内及以下受压土层，经预压所完成的竖向变形和平均固结度应满足设计要求。

2 应对预压后的地基进行原位十字板剪切试验或静力触探试验和室内土工试验，检测深度不应小于设计处理深度，检测数量应满足设计要求，且不少于 3 点。

3 排水固结施工过程中应对孔隙水压力、分层沉降、浅层沉降等进行监测，并对各项施工参数和监测结果进行记录和分析。



9 水泥土搅拌桩复合地基

9.1 一般规定

9.1.1 对于淤泥、淤泥质土、素填土、黏性土、粉土以及无流动地下水的饱和松散砂土等地基，可采用水泥土搅拌桩进行地基处理。

9.1.2 对于泥炭土、有机质土、pH 值小于 4 的酸性土、杂填土、塑性指数大于 25 的黏土，或无工程经验，应通过现场试验确定水泥土搅拌桩的适用性。

9.1.3 确定水泥土搅拌桩复合地基方案前，应查明地基土的物理力学性质，包括含水率、塑性指数、有机质含量、地下水侵蚀性和 pH 值等。

9.2 设计

9.2.1 水泥土搅拌桩设计桩长喷浆搅拌法不宜超过 20m，喷粉搅拌法不宜超过 15m，桩端宜设置在相对较好土层；桩直径宜为 500mm ~ 600mm，桩中心间距宜为 2 ~ 3 倍桩直径。

9.2.2 水泥土搅拌桩宜采用正三角形、正方形或矩形布置。

9.2.3 水泥土搅拌桩宜选用强度等级为 42.5MPa 及以上的普通硅酸盐水泥，水泥掺量可取被加固土体质量的 12% ~ 20%，水灰比宜为 0.45 ~ 0.55；根据需要可加入外加剂及掺合料，其类型和掺量应通过试验确定。

9.2.4 水泥土搅拌桩复合地基宜在桩顶设置褥垫层，厚度宜为

300mm~500mm。褥垫材料宜采用中砂、粗砂、级配砂石和碎石等，最大粒径不宜大于20mm，褥垫层的夯填度不应大于0.92。

9.3 施 工

9.3.1 水泥土搅拌桩可采用喷浆搅拌法（湿法）施工或喷粉搅拌法（干法）施工。水泥土搅拌桩施工前应进行室内配比试验，选择满足设计强度要求的水泥、外加剂及其掺量，并进行原位工艺性试验，确定施工工艺及施工相关参数等。

9.3.2 水泥土搅拌桩施工钻进速度宜控制在 $0.4\text{m}/\text{min} \sim 0.7\text{m}/\text{min}$ ，提钻速度不得大于 $0.8\text{m}/\text{min}$ ，宜全桩长复搅。

9.3.3 施工时应保持搅拌桩机底盘水平和导向架竖直，水泥土搅拌桩的垂直度偏差不得大于1%，桩位偏差不得大于100mm，成桩直径和桩长不得小于设计值。

9.3.4 水泥土搅拌桩湿法施工前，应确定灰浆泵输浆量、灰浆经输浆管到达搅拌桩机喷浆口的时间和起吊设备提升速度等施工参数。

9.3.5 施工用水泥应过筛，制备浆液不得离析，泵送浆应连续。

9.3.6 拌制水泥浆液的灌数、水泥和外加剂用量以及泵送浆液的时间应记录；喷浆量及搅拌深度应采用经国家计量部门认证的监测仪器进行自动监测、记录；搅拌桩机喷浆提升的速度和次数应符合施工工艺要求。

9.3.7 水泥土搅拌桩干法施工前，应检查搅拌机械、供粉泵、送气（粉）管路、接头以及阀门的密封性和可靠性。搅拌头的直径应定期检查，其磨损量不得大于10mm。

9.4 质量控制与检测

9.4.1 搅拌桩复合地基质量检测应在桩体施工 28d 后进行，检测桩体的分布应均匀、随机、合理，其检测内容、方法和数量应满足如下规定：

1 桩身强度和均匀性检测，采用双管单动取样器钻取芯样进行无侧限抗压强度试验，抽检数量为总桩数的 0.5%，且不少于 3 根。有可靠工程经验，可采用动力触探、标准贯入试验等方法进行检测。

2 单桩承载力特征值检测，可采用单桩静载荷试验，抽检数量为总桩数的 0.5%，且不少于 3 根。

3 单桩复合地基承载力特征值检测，采用静载荷试验，抽检数量为总桩数的 0.5%，且不少于 3 根。

4 对于道路路基，可按照上述 1 和 3 进行组合检测；对于道路挡土墙、通道、箱涵等建（构）筑物，可按照上述 1、2 和 3 进行全组合检测，其检测尚应符合《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 的规定。

10 高压旋喷桩复合地基

10.1 一般规定

10.1.1 对于淤泥、淤泥质土、以建筑垃圾为主的杂填土、素填土、黏性土、粉土以及无流动地下水的饱和松散砂土等地基，可采用高压旋喷桩进行地基处理。

10.1.2 对于泥炭土、有机质土、pH 值小于 4 的酸性土、不以建筑垃圾为主的杂填土、塑性指数大于 25 的黏土，或无工程经验，应通过现场试验确定高压旋喷桩的适用性。

10.1.3 确定旋喷桩复合地基方案前，应查明地基土的物理力学性质，包括含水率、塑性指数、有机质含量、地下水侵蚀性和 pH 值等。

10.2 设计

10.2.1 高压旋喷桩桩端宜设置在相对较好土层；桩直径宜为 500mm ~ 1000mm，桩中心间距宜为 2.5 ~ 4 倍桩直径。

10.2.2 高压旋喷桩宜采用正三角形、正方形或矩形布置。

10.2.3 高压旋喷桩宜选用强度等级为 42.5MPa 及以上的普通硅酸盐水泥，水泥掺量可取被加固土体质量的 25% ~ 40%，水灰比宜为 0.8 ~ 1.5；根据需要可加入外加剂及掺合料，其类型和掺量应通过试验确定。

10.2.4 高压旋喷桩复合地基宜在桩顶设置褥垫层，厚度宜为 300mm ~ 500mm。褥垫材料宜采用中砂、粗砂、级配砂石和碎石

等，最大粒径不宜大于 20mm，褥垫层的夯填度不应大于 0.92。

10.3 施 工

10.3.1 高压旋喷桩可采用单管法、双管法和三管法施工。高压旋喷桩施工前应进行室内配比试验，选择满足设计强度要求的水泥、外加剂及其掺量；并进行原位工艺性试验，确定施工工艺及施工相关参数等。

10.3.2 高压旋喷桩旋转速度一般控制在 $10\text{r/min} \sim 20\text{r/min}$ ，钻杆提升速度一般为 $0.1 \sim 0.25\text{m/min}$ ，单管法、双管法高压水泥浆和三管法高压水的压力应大于 20MPa，流量应大于 30L/min ，气流压力宜大于 0.7MPa。

10.3.3 施工时应保持高压旋喷桩机底盘水平，高压旋喷桩的垂直度偏差不得大于 1%，桩位偏差不得大于 100mm，成桩直径和桩长不得小于设计值。

10.3.4 喷射孔与高压注浆泵的距离不宜大于 50m，管路系统应畅通。

10.3.5 确定压力下试喷 1min，采用容器收集喷出浆液，测量浆液量，与桩机施工记录仪对比施工时间与喷浆量，校对施工记录仪。

10.3.6 喷嘴下钻达到设计标高即可喷射注浆，在喷射注浆参数达到要求后按旋喷工艺提升喷射管，由下而上旋转喷射注浆。

10.3.7 旋喷注浆过程中出现压力骤然下降、上升或冒浆异常，应及时查明原因并采取有效措施，旋喷注浆完毕应及时拔出喷射管。

10.4 质量控制与检测

10.4.1 高压旋喷桩复合地基质量检测应在桩体施工 28d 后进

行，检测桩体的分布应均匀、随机、合理，其检测内容、方法和数量应满足如下规定：

1 桩身强度和均匀性检测，采用双管单动取样器钻取芯样进行无侧限抗压强度试验，抽检数量为总桩数的 0.5%，且不少于 3 根。有可靠工程经验，可采用动力触探、标准贯入试验等方法进行检测。

2 单桩承载力特征值检测，可采用单桩静载荷试验，抽检数量为总桩数的 0.5%，且不少于 3 根。

3 单桩复合地基承载力特征值检测，采用静载荷试验，抽检数量为总桩数的 0.5%，且不少于 3 根。

4 对于道路路基，可按照上述 1 和 3 进行组合检测；对于道路挡土墙、通道、箱涵等建（构）筑物，可按照上述 1、2 和 3 进行全组合检测，其检测尚应符合《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 的规定。

WHCIA

11 水泥粉煤灰碎石桩及素混凝土桩复合地基

11.1 一般规定

11.1.1 对于黏性土、粉土、砂土、残积土、杂填土、素填土等地基，可采用水泥粉煤灰碎石桩（CFG 桩）及素混凝土桩进行地基处理。

11.1.2 对于淤泥、淤泥质土、泥炭质土以及地基中夹有较大粒径的碎石、卵石层时，或无工程经验，应通过现场试验确定 CFG 桩及素混凝土桩的适用性。

11.2 设计

11.2.1 CFG 桩及素混凝土桩设计桩长不宜超过 20m，桩端宜设置在相对较好土层，应为摩擦型桩；桩直径宜为 400mm ~ 600mm，桩中心间距宜为 3 ~ 6 倍桩直径。

11.2.2 CFG 桩及素混凝土桩宜采用正三角形、正方形或矩形布置；宜设置正方形桩帽，桩帽边长宜为 800mm ~ 1200mm；采用钢筋混凝土桩帽时，混凝土强度等级不应低于 C25。

11.2.3 CFG 桩及素混凝土桩宜选用强度等级为 42.5MPa 及以上的普通硅酸盐水泥。

11.2.4 桩顶应设置褥垫层，褥垫层厚度可为 300mm ~ 500mm。褥垫材料宜采用中砂、粗砂、级配砂石和碎石等，最大粒径不宜大于 20mm，褥垫层的夯填度不应大于 0.92。

11.3 施 工

11.3.1 一般采用长螺旋施工工艺和振动沉管施工工艺。施工前应按设计要求进行室内配比试验,并进行原位工艺性试验,确定施工工艺及施工相关参数等。

11.3.2 按配合比配制混合料,长螺旋施工工艺混合料的坍落度宜为 160mm~200mm,振动沉管施工工艺混合料的坍落度宜为 30mm~50mm;灌注成桩后桩顶浮浆厚度不宜超过 200mm。

11.3.3 长螺旋成桩施工钻至设计深度后,应控制提钻时间,混合料泵送量应与提钻速度相匹配。

11.3.4 振动沉管施工钻至设计深度后,拔管速度宜为 1.2m/min~1.5m/min,淤泥、淤泥质土等软弱土层内拔管速度应适当放慢。

11.3.5 振动沉管成桩施工宜隔桩跳打,混凝土浇注完毕 24h 后方可施工相邻桩。

11.3.6 桩的垂直度偏差不应大于 1/200;不得造成桩顶标高以下桩身断裂或桩间土扰动。

11.3.7 施工作业面高出桩顶设计标高较大时,宜增加混凝土灌注量。

11.3.8 冬期施工时,混合料入孔温度不得低于 5℃,对桩头和桩间土应采取保温措施。

11.3.9 褥垫层铺设可采用静力压实法和振动压实法,夯填度应满足设计要求。

11.4 质量控制与检测

11.4.1 CFG 桩及素混凝土桩复合地基质量检测应在桩体施工

28d 后进行，检测桩体的分布应均匀、随机、合理，其检测内容、方法和数量应满足如下规定：

1 桩身完整性检测，可采用低应变法，抽检数量为总桩数的 20%，且不少于 10 根。低应变检测成果有疑问时应在桩体中心处、桩长范围内垂直钻孔取芯，检测桩体完整性、均匀性，并在桩身上、中、下不同深度取不少于 3 组试样作抗压强度试验。

2 单桩承载力特征值检测，可采用单桩静载荷试验，抽检数量为总桩数的 0.5%，且不少于 3 根。

3 单桩复合地基承载力特征值检测，可采用静载荷试验，抽检数量为总桩数的 0.5%，且不少于 3 根。

4 对于道路路基，可按照上述 1 和 3 进行组合检测；对于道路挡土墙、通道、箱涵等建（构）筑物，可按照上述 1、2 和 3 进行全组合检测，其检测尚应符合《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 的规定。

WHCIA

12 预制桩复合地基

12.1 一般规定

12.1.1 对于淤泥、淤泥质土、黏性土、粉土、砂土、杂填土、素填土等地基，可采用预制桩进行地基处理。

12.1.2 预制桩按截面形式可分为管桩、方桩等；按截面构造可分为实心桩和空心桩；按材料及受力可分为预制混凝土桩、预应力混凝土管桩等。

12.2 设计

12.2.1 预制桩设计桩长不宜超过 30m，桩端宜设置在相对较好土层；预制混凝土桩边长或直径宜为 300mm ~ 600mm，桩中心间距宜为 3.5 ~ 6 倍桩直径。

12.2.2 预制桩宜采用正三角形、正方形或矩形布置；宜设置正方形桩帽，桩帽边长宜为 800mm ~ 1200mm；采用钢筋混凝土桩帽时，混凝土强度等级不应低于 C25。

12.2.3 桩顶应设置褥垫层，褥垫层厚度可为 300mm ~ 500mm。褥垫材料宜采用中砂、粗砂、级配砂石和碎石等，最大粒径不宜大于 20mm，褥垫层的夯填度不应大于 0.92。

12.3 施工

12.3.1 一般采用静压施工工艺和锤击施工工艺。施工前应按设计要求进行原位工艺性试验，确定施工工艺及施工相关参数等。

12.3.2 施工时应设置观测点，对先期沉入桩体进行上浮、下沉以及水平位移观测。

12.3.3 混凝土实心桩强度达到 70% 及以上方可起吊，达到 100% 方可运输；桩体起吊应平稳；桩的连接可采用焊接、法兰连接等。

12.3.4 预应力混凝土空心桩出厂前应作出厂检查，其规格、批号、制作日期应符合要求；堆放场地应平整坚实，最下层与地面接触的垫木应有足够的宽度和高度；堆放桩体应稳固，不得滚动；宜单层堆放，叠层堆放时，应采用垫木、木楔等措施保证堆放稳定。

12.3.5 锤击沉桩：

1 桩端位于一般土层时，应以控制桩端设计标高为主，贯入度为辅；桩端达到坚硬、硬塑的黏性土、中密以上粉土、砂土、碎石类土及风化岩时，应以贯入度控制为主，桩端标高为辅；贯入度已达到设计要求而桩端标高未达到时，应继续锤击 3 阵，并按每阵 10 击的贯入度不应大于设计规定的数值确认，必要时施工控制贯入度通过现场试验确定。

2 预应力混凝土管桩的总锤击数及最后 1.0m 沉桩锤击数应根据桩身强度和当地工程经验确定。

3 送桩深度不宜大于 2.0m；桩顶打至接近地面需要送桩时，应测出桩的垂直度并检查桩顶质量，合格后应及时送桩。

4 施工现场应配备桩身垂直度观测仪和观测人员，适时量测桩身垂直度。

12.3.6 静压沉桩：

1 应核实并标记压桩机配重；液压式压桩机的最大压桩力

应取压桩机的机架重量和配重之和乘以 0.9，且不小于设计单桩竖向极限承载力标准值。

2 第一节桩下压时垂直度偏差不应大于 0.5%，宜将每根桩一次性连续压到底，大面积桩群，应控制每日压桩量。

3 送桩应采用专制钢质送桩器，不得将工程桩用作送桩器。

4 设计要求或施工需要采用引孔法压桩时，宜配备螺旋钻孔机，或在压桩机上配备专用的螺旋钻；桩端需进入较坚硬岩层时，宜配备可入岩的钻孔桩机或冲孔桩机。

12.3.7 桩顶以上 1.0m 内的土方，应采用人工开挖与小型挖土机械相结合的方法。桩顶高低不齐时，应人工逐批开挖出桩头，截桩后再行施工。

12.3.8 遇下列特殊情况之一时应暂停沉桩：

- 1 压桩力或沉桩贯入度突变；
- 2 沉桩入土深度与设计要求差异大；
- 3 实际沉桩情况与地质报告中的土层性质明显不符；
- 4 桩头或桩身混凝土出现裂缝、剥落、破碎；
- 5 桩身突然倾斜；
- 6 地面明显隆起、邻桩上浮或位移过大；
- 7 沉桩过程出现异常声响。

12.3.9 褥垫层铺设可采用静力压实法和振动压实法，夯填度应满足设计要求。

12.4 质量控制与检测

12.4.1 预制桩复合地基质量检测应在桩体施工 25d 后进行，检测桩体的分布应均匀、随机、合理，其检测内容、方法和数量应

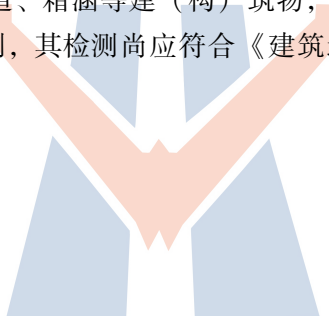
满足如下规定：

1 桩身完整性检测，可采用低应变法，抽检数量为总桩数的 20%，且不少于 10 根。

2 单桩承载力特征值检测，可采用单桩静载荷试验，抽检数量为总桩数的 0.5%，且不少于 3 根。

3 单桩复合地基承载力特征值检测，可采用静载荷试验，抽检数量为总桩数的 0.5%，且不少于 3 根。

4 对于道路路基，可按照上述 1 和 3 进行组合检测；对于道路挡土墙、通道、箱涵等建（构）筑物，可按照上述 1、2 和 3 进行全组合检测，其检测尚应符合《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 的规定。

The logo of the World Health Conference International Association (WHCIA) is centered on the page. It features a stylized 'W' shape composed of four triangles: two light blue triangles on the left and right, and two light orange triangles in the center. Below this graphic, the acronym 'WHCIA' is written in a bold, blue, sans-serif font.

WHCIA

13 多向加芯搅拌桩复合地基

13.0.1 对于淤泥、淤泥质土、素填土、黏性土、粉土以及无流动地下水的饱和松散砂土等地基，可采用多向加芯搅拌桩进行地基处理。

13.0.2 对于泥炭土、有机质土、pH 值小于 4 的酸性土、杂填土、塑性指数大于 25 的黏土，或无工程经验，应通过现场试验确定多向加芯搅拌桩的适用性。

13.0.3 多向加芯搅拌桩按桩芯长短可分为多向短芯搅拌桩和多向长芯搅拌桩。15m 以内地基处理宜采用短芯搅拌桩，大于 15m 地基处理宜采用长芯搅拌桩。

13.0.4 多向加芯搅拌桩宜选用强度等级为 42.5MPa 及以上的普通硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥。水泥掺量可为被加固土体质量的 12% ~ 20%，水灰比可为 0.50 ~ 0.70。

13.0.5 多向加芯搅拌桩的直径一般为 500mm ~ 700mm，宜采用正三角形、正方形或矩形布置，桩中心间距宜为 3 ~ 5 倍桩直径。

13.0.6 多向加芯搅拌桩施工工艺一般采用水泥土搅拌 + 静力压芯桩工艺或水泥土搅拌 + 沉管灌注工艺。施工前应按设计要求进行原位工艺性试验，确定施工工艺及施工相关参数等。

13.0.7 多向加芯搅拌桩质量检验主要包括以下内容：

1 水泥土搅拌桩质量检验：水泥用量、桩长、搅拌头转数和升降速度、复搅次数和深度、喷浆时间、停浆处理方法等。

2 预制混凝土芯桩的静力压芯桩质量检验：桩位、桩顶标

高、芯桩垂直度、芯桩连接质量、沉芯桩深度等。

3 现场沉管灌注芯桩质量检验：桩位、桩顶标高、沉管垂直度、混凝土灌注质量、充盈系数、灌注芯桩深度等。



14 环境影响因素与保护措施

14.1 一般规定

14.1.1 地基处理工程应采用先进可靠、低碳环保的设计理念、施工工艺、高效能设备、信息化监控及管理技术等，结合过程监控和动态控制等措施确保工程及环境安全。

14.1.2 地基处理环境保护应涵盖勘测、设计、施工及监测等各阶段。

14.1.3 地基处理环境保护应包括设备进场及组装、场平施工、清障施工、地基处理施工及路基回填施工等地基处理施工全过程。

14.1.4 应根据地层特点、周边环境状况及环境保护要求，分析地基处理施工全过程可能产生的变形、开裂等不利环境影响，并采取相应保护措施。

14.1.5 地基处理施工过程中应对周边环境进行全过程监测和日常巡查，根据监测资料和巡查情况对设计和施工进行动态调整。

14.2 环境影响因素

14.2.1 环境影响因素包括环境自身因素及地基处理工程因素。

14.2.2 环境自身因素主要包括：

1 房屋、铁塔、架空线、桥梁、堤防、铁路等各种建（构）筑物的现状、基础型式、埋深、与地基处理工程的距离、使用时间、所处场地地形地貌及地质等；

2 雨水、污水、给水、通讯、电力、燃气、军缆等各种地下管线的现状、管材、管节连接形式、基础型式、埋深、与地基处理工程的距离、使用时间、所处场地地质等；

3 箱涵、管廊、地下室、隧道、地铁等各种地下构筑物的基础型式、结构型式、变形缝连接形式、埋深、与地基处理工程的距离、使用时间、所处场地地质等；

4 地基处理范围内已施工的工程桩、箱涵、管道等；

5 江河湖泊、周边地表水水位、降雨等。

14.2.3 地基处理工程因素主要包括：

1 工程地质条件与水文地质条件；

2 地基处理的设计、施工、检测、监测；

3 设备进场及组装、场平及清障施工；

4 应急管理。

14.3 对环境的保护措施

14.3.1 地基处理施工前应对地基处理影响范围内的环境因素调查取证。

14.3.2 设计措施

1 地基处理边线尽量远离环境保护对象；

2 邻近环境保护对象的地基处理不宜采用堆载预压法、真空预压法和真空-堆载联合预压法；

3 邻近环境保护对象的地基处理不宜采用振动、挤土作用明显或高压旋喷桩等扰动较大的桩型；

4 条件具备时环境保护对象与地基处理之间可设置减振沟、减压孔、隔离桩或隔离墙等措施。

14.3.3 施工措施

1 对变形控制有严格要求的环境保护对象应编制专项施工保护方案，并按照规定与相关权属部门协调备案；

2 紧邻环境保护对象侧不宜设置施工道路、材料堆场等，设备进场、组装及场平施工应能确保设备及场地的稳定性；根据场地条件及周边环境条件采取需要的加固、监控等措施；

3 应选择对环境影响小的施工设备及机械进行施工，并应在远离保护对象的位置进行工艺性试验，合理确定施工参数；邻近环境保护对象的地基处理宜分段施工；

4 清障工艺应根据障碍物的状况、地质条件、保护对象的保护要求等综合确定，并制订专项清障方案；紧邻保护对象且明挖清障对其有影响时，可采用全回转全套管钻进工艺进行清障，清障后应及时分层压实回填。

14.3.4 对变形控制有严格要求的环境保护对象应编制专项监测方案；环境保护对象的变形控制标准应按照相关规定及要求确定，应考虑其历史变形及地基处理施工全过程变形。

14.3.5 现场监测数据应及时整理、反馈并与现场巡查等情况进行比较分析，以利指导施工。

14.3.6 应急管理措施

1 对邻近环境保护对象的地基处理及保护对象进行风险评估并编制应急预案；

2 应急预案应明确应急管理体系、应急响应条件、应急响应程序、响应升级条件、应急演练等；

3 地基处理施工应根据应急预案的要求落实应急抢险队伍，现场配备人员、设备、物资及专家团队等应急处理资源，应急预

案宜在地基处理施工前进行演练；

4 应急抢险过程中应根据险情变化情况及时进行风险评估与方案调整。



15 施工安全与环保

15.1 施工安全

15.1.1 工程项目应根据工程特点制定各项安全生产管理制度，建立健全安全生产管理体系。

15.1.2 施工现场应根据安全事故类型采取防护措施，对存在的安全问题和隐患应及时整改。

15.1.3 机械操作人员应按机械使用说明书规定的技术性能、承载能力和使用条件正确操作、合理使用机械，严禁超载、超速作业或扩大使用范围。

15.1.4 机械操作装置应灵敏，各种仪表功能应完好，指示装置应醒目、直观、清晰。

15.1.5 机械上的各种安全防护装置、保险装置、报警装置应齐全有效，不得随意更换、调整或拆除。

15.1.6 机械作业应设置安全区域，严禁非作业人员在作业区停留、通过、维修或保养机械。清洁、保养、维修机械时应设置警示标识。

15.1.7 应根据各工种的作业条件和劳动环境等为作业人员配备安全有效的劳动防护用品，并应及时开展劳动防护用品使用培训；高处作业应系安全带。

15.1.8 各类设施、设备应具备制造许可证或其他质量证明文件。

15.1.9 机械作业前，应对机械进行检查、试运转，应向操作人员进行安全与技术交底。操作人员应熟悉作业环境和作业条件，

遵守现场安全管理规定。

15.1.10 操作人员在作业过程中，不得擅自离开工作岗位或将机械交给其他无证人员操作。

15.1.11 操作人员应做好机械保养维修工作，并做好维修保养记录。

15.1.12 实行多班作业机械，应执行交接班制度，填写交接班记录。

15.1.13 应为机械提供道路、水电、作业棚及停放场地等作业条件，夜间作业应照明充足。

15.1.14 机械设备的地基基础承载力应满足安全使用要求；机械安装、试机、拆卸应按使用说明书的要求进行。

15.1.15 机械集中停放的场所、大型内燃机械，应有专人看管，并应按规定配备消防器材；机房及机械周边不得堆放易燃、易爆物品。

15.1.16 乙炔站、氧气站、空气压缩机房、发电机房、锅炉房等易燃易爆场所，挖掘机、起重机、打桩机等易发生安全事故的施工现场，应设置警戒区域，悬挂警示标志，非工作人员不得入内。

15.1.17 在机械产生对人体有害的气体、液体、尘埃、放射性射线、振动、噪声等场所，应配置有效的安全保护设施、监测设备或仪器、废品处理装置等。

15.1.18 应做好停用或封存前的保养工作，应采取预防风沙、雨淋、水泡、锈蚀等措施。

15.1.19 施工现场用电的保护接地与防雷接地应符合下列规定：

1 保护接地导体（PE）、接地导体和保护联结导体应确保自身可靠连接；

- 2 采用剩余电流动作保护电器时应装设保护接地导体（PE）；
- 3 共用接地装置的电阻值应满足各种接地的最小电阻值的要求。

15.1.20 施工用电的发电机组电源应与其他电源互相闭锁，严禁并列运行。

15.1.21 施工现场配电线路应符合下列规定：

- 1 线缆敷设应采取有效保护措施，防止对线路的导体造成机械损伤和介质腐蚀。

- 2 电缆中应包含全部工作芯线、中性导体（N）及保护接地导体（PE）或保护中性导体（PEN）；保护接地导体（PE）及保护中性导体（PEN）外绝缘层应为黄绿双色；中性导体（N）外绝缘层应为淡蓝色；不同功能导体外绝缘色不应混用。

15.1.22 施工现场的特殊场所照明应符合下列规定：

- 1 手持式灯具应采用供电电压不大于 36V 的安全特低电压（SELV）供电；

- 2 照明变压器应使用双绕组型安全隔离变压器，严禁采用自耦变压器；

- 3 安全隔离变压器严禁带入金属容器或金属管道内使用。

15.1.23 电气设备检修、线路维修时，严禁带电作业。应切断并隔离相关配电回路及设备的电源，并应检验、确认电源被切除对应配电间的门、配电箱或切断电源的开关上锁，及应在锁具或其箱门、墙壁等醒目位置设置警示标识牌。

15.1.24 管道、容器内进行焊接作业时，应采取可靠的绝缘或接地措施，并应保障通风。

15.1.25 吊装作业前应设置安全保护区域及警示标识，吊装作

业时应安排专人监护，防止无关人员进入；严禁任何人在吊物或起重臂下停留或通过。

15.1.26 使用吊具和索具的性能、规格应满足吊运要求，并与环境条件相适应；作业前应对吊具与索具进行检查，确认完好后方可投入使用；承载时不得超过额定荷载。

15.1.27 吊装重量不应超过起重设备的额定起重量，吊装作业严禁超载，严禁斜拉或起吊不明重量的物体。

15.1.28 吊装作业时，对未形成稳定体系的部分应采取临时固定措施。对临时固定的构件，应在安装固定完成并经检查确认无误后，方可解除临时固定措施。

15.1.29 大型起重机械严禁在雨、雪、雾、霾、沙尘等低能见度天气时进行安装拆卸作业。

15.2 环 保

15.2.1 场地硬化可采用铺设混凝土、碎石等方法，并定期洒水养护。

15.2.2 宜采用容器运输或搭设专用封闭式垃圾通道清运垃圾。

15.2.3 施工现场不得焚烧废弃物。

15.2.4 施工污水废水必须经处理达到排放标准后，方可有序排放；有毒物质、易燃易爆物品和油类应分类集中存放，回收处理。

15.2.5 扬尘控制应满足《中华人民共和国大气污染防治法》、现行行业标准《建设工程施工现场环境与卫生标准》JGJ 146、《湖北省大气污染防治条例》等法规、标准的相关要求。

15.2.6 噪声控制应满足《中华人民共和国环境噪声污染防治

法》、现行国家标准《建筑施工场界环境噪声排放标准》GB 12523 及《湖北省环境噪声污染防治条例》等法规、标准的相关要求。

15.2.7 废弃物控制应满足《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》、现行行业标准《建筑垃圾处理技术标准》CJJ/T 134 及《湖北省建筑垃圾治理条例》等法规、标准的相关要求。



16 监 测

16.1 一般规定

16.1.1 地基处理监测工作应贯穿地基处理工程全过程。从设备进场、组装及场平施工开始，到地基处理工程按设计要求完成，应由具备相应监测资质的单位对道路路基和复合地基进行监测，并根据监测数据进行动态设计、信息化施工。

16.1.2 地基处理监测工作应具备下列资料：

- 1 红线图、地形地貌图及总平面图等工程资料；
- 2 岩土工程勘察资料；
- 3 地基处理设计资料；
- 4 地基处理影响范围内的建（构）筑物、地下管涵等有关资料；
- 5 地基处理施工方案。

16.1.3 监测单位在现场踏勘、资料收集后，应根据地基处理设计要求、施工技术要求及有关规范要求等编制监测方案，监测方案应包括以下内容：

- 1 工程概况；
- 2 场地岩土工程条件、地基处理周边环境状况及地基处理监测的设计要求；
- 3 监测目的和依据；
- 4 监测对象、监测项目、监测点布置和监测方法及精度；
- 5 监测元件、仪器及检测要求；

- 6 监测周期、监测频率和报警值；
- 7 监测预警、异常及危险情况下的监测措施；
- 8 资料整理方法及监测成果形式；
- 9 监测人员的配备、作业安全、质量管理体系及信息反馈制度。

16.1.4 监测单位应严格实施监测方案；地基处理设计或施工方案有较大变更时，监测单位应及时调整监测方案。

16.1.5 监测单位应做好监测设施保护工作，建设、施工、监理等相关建设各方应协助监测单位保护监测设施。

16.2 监测项目

16.2.1 监测项目应根据道路等级、环境保护要求、场地特点、路基处理形式、施工工艺等因素综合确定，应采用仪器监测与现场巡查相结合的方法。地基处理工程施工前应对周边环境进行调查并完成相应的鉴定工作。

16.2.2 软弱土道路地基及路基施工中，应根据监测目的按表 16.2.2 确定监测项目。

表 16.2.2 沉降与水平位移监测项目

监测项目	监测仪器设备	监测主要目的
地表沉降	沉降板、水准仪	1. 监测地表沉降，控制加载速率； 2. 预测沉降趋势，确定预压卸载时间； 3. 提供施工期间沉降增加土方量的计算依据
地表水平位移	水平位移桩、测距仪、经纬仪、钢尺	监测地表水平位移及地表隆起情况，用于路基及路堤施工过程中的稳定性控制

续表 16.2.2

监测项目	监测仪器设备	监测主要目的
地基深层水平位移	测斜管、测斜仪	1. 监测地基深层土体水平位移，掌握土体剪切破坏的位置，分析潜在滑动面发展变化，评价地基稳定性； 2. 用于路基及路堤施工过程中的稳定性控制

16.2.3 地基处理工程周边分布有铁路、轨道交通（地铁及轻轨）、隧道、桥梁、综合管廊、压力管道、堤防、高压铁塔或其他对变形有特殊要求的建（构）筑物及设施时，监测项目应与相关单位或部门协商，并按相关要求编制专项监测方案。

16.3 监测点布置

16.3.1 监测点布置应根据设计要求、道路等级、周边临近建（构）筑物状况、地下管涵现状、地基处理的类型及地基处理施工方案等综合确定，应能反映监测对象的实际状况及其变化趋势，满足设计、管理和信息化施工的要求。

16.3.2 地表沉降监测断面在一般路段宜每 100m 布置一处；在预压施工高度达到极限高度的路段，宜每 50m 布置一处；在跨度大于 30m 的结构物的两端相邻路堤段应各布置一处，跨度小于 30m 时可仅在一端布置。在地质条件差、地形变化大、不同地基处理方式衔接的部位应加密设置监测断面。

16.3.3 沉降监测断面上的沉降板宜设置在道路中心，与箱涵、通道等结构物相邻路堤段宜在两侧路肩及边坡坡脚位置增设沉降板。

16.3.4 填挖交界处、沿河等易发生边坡失稳部位应设置监测

断面。

16.3.5 水平位移基桩宜设置在路堤边坡坡脚外 10m 范围内的位置，每侧宜设置 3~4 个点；基桩埋设后露出地面的高度不宜大于 100mm，基桩周围宜浇筑混凝土稳固体。

16.3.6 沉降与水平位移监测点宜布置在同一横断面上。

16.3.7 邻近建（构）筑物监测点布置间距不宜大于 30m，建（构）物每个角点宜布置监测点，圆形、多边形的建（构）筑物宜沿纵横轴线对称布置。

16.3.8 监测点布置应稳定可靠，标识清晰；应不妨碍监测对象的正常工作，监测过程应减少对施工作业的不利影响。

16.3.9 相关方应对监测点的布置进行验收。

16.4 监测方法及精度要求

16.4.1 监测方法应结合设计要求、现场条件、地区经验等因素综合确定。

16.4.2 变形监测网的基准点、工作基点的布置应符合下列要求：

1 基准点应稳定、可靠，基准点在施工前埋设，并经监测确认稳定后，方可投入使用；

2 工作基点应选在相对稳定和方便使用的位置，通视条件良好可直接将基准点作为工作基点；

3 监测期间，应定期检查基准点和工作基点的稳定性，定期联测和复测，变形基准网精度应满足相关标准和规定。

16.4.3 监测仪器和元件的灵敏度和精度应满足使用要求，且有良好的稳定性和可靠性；应标定合格。

16.5 监测频率及沉降稳定标准

16.5.1 各监测项目应测定可靠的初始数据。

16.5.2 设备进场、组装及场平施工时应开始进行沉降监测，可每周1次；桩体施工及换填施工，沉降监测宜每周1~2次；填土施工期应每填一层监测1次，路堤填高达到设计高度后应每天监测1次；监测趋向收敛监测频率可适当放缓。监测数据变化较大或沉降速率加快、监测值达到或接近报警值、遇不良天气状况、横穿现状管涵或出现其他影响道路地基及周边环境安全的异常情况，应加密监测。

16.5.3 沉降稳定标准宜由沉降变化速率与累计变化值控制，对于特殊要求或特殊情况，宜专项论证。

1 换填垫层与压实地基，其沉降稳定标准为连续两个月每月沉降不大于7mm，且根据推测计算总沉降量不大于设计值。

2 强夯和强夯置换等夯实地基，其沉降稳定标准为连续两个月每月沉降不大于7mm，且根据推测计算总沉降量不大于设计值。

3 堆载预压、真空预压及真空-堆载联合预压等预压地基，其沉降稳定标准详见本规程第8章相关规定。

4 水泥土搅拌桩、高压旋喷桩、CFG桩、素混凝土桩、预制桩及多向加芯搅拌桩等桩体复合地基，其沉降稳定标准为连续两个月每月沉降不大于5mm，且根据推测计算总沉降量不大于设计值。

16.6 监测成果

16.6.1 监测成果应包括监测日报表、监测阶段性报告和监测总

结报告；监测成果应真实、准确、及时。

16.6.2 监测日报表应包括下列内容：

- 1** 当日天气情况和施工情况，当时巡查情况；
- 2** 各监测点的本次监测值、本次变化值、变化速率及累计值等数据，并附相关图表；
- 3** 监测数据的综合分析和评述。

16.6.3 监测阶段性报告应对各监测项目监测值的变化进行分析、评价和预测，提出相关设计、施工和管理建议。

16.6.4 监测结束后应提交完整的监测总结报告，报告内容应包括工程概况、监测依据、监测目的、监测对象、监测项目、监测点布置、监测设备和监测方法、监测频率、监测报警值、各监测项目全过程发展变化的分析及整体评价、监测工作结论与建议等内容。

16.6.5 监测成果应及时归档。

WHCIA

17 验 收

17.1 一般规定

17.1.1 地基处理工程施工质量验收应符合下列规定：

- 1 地基处理工程施工质量应符合验收规定要求；
- 2 质量验收程序应符合验收规定要求；
- 3 质量验收应在施工单位自行检查评定合格的基础上进行；
- 4 质量验收应进行分部、分项工程验收；
- 5 质量验收应按主控项目和一般项目验收。

17.1.2 地基处理工程验收应提交下列资料：

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

17.1.3 施工前及施工过程中所进行的检验项目应记录、校审、存档。

17.1.4 地基处理工程必须进行验槽，验槽检验要点应符合本规程附录 A 的规定。

17.1.5 主控项目质量检验结果必须全部符合检验标准，一般项目的验收合格率不得低于 80%。

17.2 夯实地基

17.2.1 施工前应检查夯锤质量和尺寸、落距控制方法、排水设施及被夯地基的土质。

17.2.2 施工中应检查夯锤落距、夯点位置、夯击范围、夯击击数、夯击遍数、每击夯沉量、最后两击的平均夯沉量、总夯沉量和夯点施工起止时间等。

17.2.3 施工结束后，应进行地基承载力、地基土强度、变形指标及其他设计要求指标的检验。

17.2.4 夯实地基质量验收标准应符合表 17.2.4 的规定。

表 17.2.4 夯实地基质量验收标准

项	序	检查项目	允许值或允许偏差		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	地基承载力	不小于设计值		静载试验
	2	处理后地基土的强度	不小于设计值		原位测试
	3	变形指标	设计值		原位测试
一般项目	1	夯锤落距	mm	± 300	钢索投标志
	2	夯锤质量	kg	± 100	称重
	3	夯击遍数	不小于设计值		计数法
	4	夯击顺序	设计要求		检查施工记录
	5	夯击击数	不小于设计值		计数法
	6	夯点位置	mm	± 500	用钢尺量
	7	夯击范围（超出基础范围距离）	设计要求		用钢尺量
	8	前后两遍间歇时间	设计值		检查施工记录
	9	最后两击平均夯沉量	设计值		水准测量
	10	场地平整度	mm	± 100	水准测量

17.3 预压地基

17.3.1 施工前应检查施工监测措施和监测初始数据、排水设施和竖向排水体等。

17.3.2 施工中应检查堆载高度、变形速率，真空预压施工时应检查密封膜的密封性能、真空表读数等。

17.3.3 施工结束后，应进行地基承载力、地基土强度、变形指标及其他设计要求指标的检验。

17.3.4 预压地基质量验收标准应符合表 17.3.4 的规定。

表 17.3.4 预压地基质量验收标准

项	序	检查项目	允许值或允许偏差		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	地基承载力	不小于设计值		静载试验
	2	处理后地基土的强度	不小于设计值		原位测试
	3	变形指标	设计值		原位测试
一般项目	1	预压荷载（真空度）	%	≥ -2	高度测量（压力表）
	2	固结度	%	≥ -2	原位测试 （与设计要求比）
	3	沉降速率	%	± 10	水准测量 （与控制值比）
	4	水平位移	%	± 10	用测斜仪、 全站仪测量
	5	竖向排水体位置	mm	≤ 100	用钢尺量
	6	竖向排水体插入深度	mm	± 1000	经纬仪测量
	7	插入塑料排水带时的回带长度	mm	≤ 500	用钢尺量
	8	竖向排水体高出砂垫层距离	mm	≥ 100	用钢尺量
	9	插入塑料排水带的回带根数	%	< 5	统计
	10	砂垫层材料的含泥量	%	≤ 5	水洗法

17.4 水泥土搅拌桩复合地基

17.4.1 施工前应检查水泥及外加剂的质量、桩位、搅拌机工作性能，并应对各种计量设备进行检定或校准。

17.4.2 施工中应检查机头提升速度、水泥浆或水泥注入量、搅拌桩的长度及标高。

17.4.3 施工结束后，应检验桩体的强度和直径，以及单桩与复合地基的承载力。

17.4.4 水泥土搅拌桩复合地基质量验收标准应符合表 17.4.4 的规定。

表 17.4.4 水泥土搅拌桩复合地基质量验收标准

项	序	检查项目	允许值或允许偏差		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	复合地基承载力	不小于设计值		静载试验
	2	单桩承载力	不小于设计值		静载试验
	3	水泥用量	不小于设计值		查看流量表
	4	桩体直径	不小于设计值		用钢尺量
	5	桩长	不小于设计值		测钻杆长度
	6	桩身强度	不小于设计值		试块强度法或钻芯法
一般项目	1	水胶比	设计值		实际用水量与水泥等胶凝材料的重量比
	2	提升速度	设计值		测机头上升距离及时间
	3	下沉速度	设计值		测机头下沉距离及时间
	4	桩顶标高	mm	± 200	水准测量
	5	桩位	$\leq 1/5D$ (D 为桩体直径)		用钢尺量
	6	钻孔垂直度	$\leq 1/100$		经纬仪测量
	7	褥垫层夯填度	≤ 0.92		水准测量

17.5 高压旋喷桩复合地基

17.5.1 施工前应检验水泥、外加剂等的质量，浆液配比，高压喷射设备的性能等，并对压力表、流量计进行检定或校准。

17.5.2 施工中应检查压力、水泥浆量、提升速度、旋转速度等施工参数及施工程序。

17.5.3 施工结束后，应检验桩体的强度和直径，以及单桩与复合地基的承载力。

17.5.4 高压旋喷桩复合地基质量验收标准应符合表 17.5.4 的规定。

表 17.5.4 高压旋喷桩复合地基质量验收标准

项	序	检查项目	允许值或允许偏差		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	复合地基承载力	不小于设计值		静载试验
	2	单桩承载力	不小于设计值		静载试验
	3	水泥用量	不小于设计值		查看流量表
	4	桩体直径	不小于设计值		用钢尺量
	5	桩长	不小于设计值		测钻杆长度
	6	桩身强度	不小于设计值		试块强度法或钻芯法
一般项目	1	水胶比	设计值		实际用水量与水泥等胶凝材料的重量比
	2	提升速度	设计值		测机头上升距离及时间
	3	旋转速度	设计值		现场测定
	4	喷射压力	设计值		检查压力表读数
	5	桩顶标高	mm	±200	水准测量
	6	桩位	$\leq 1/5D$ (D 为桩体直径)		用钢尺量
	7	钻孔垂直度	$\leq 1/100$		经纬仪测量
	8	褥垫层夯填度	≤ 0.92		水准测量

17.6 水泥粉煤灰碎石桩及素混凝土桩复合地基

17.6.1 施工前应对入场水泥、粉煤灰、砂及碎石等原材料进行检验。

17.6.2 施工中应检查桩身混合料的配合比、坍落度和成孔深度、混合料充盈系数等。

17.6.3 施工结束后，应检验桩体的强度和直径，以及单桩与复合地基的承载力。

17.6.4 水泥粉煤灰碎石桩及素混凝土桩复合地基的质量验收标准应符合表 17.6.4 的规定。

表 17.6.4 水泥粉煤灰碎石桩及素混凝土桩复合地基质量验收标准

项	序	检查项目	允许值或允许偏差		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	复合地基承载力	不小于设计值		静载试验
	2	单桩承载力	不小于设计值		静载试验
	3	桩长	不小于设计值		测钻杆长度或用测绳测孔深
	4	桩体直径	不小于设计值		用钢尺量
	5	桩身完整性	—		低应变检测
一般项目	1	混合料坍落度	mm	160 ~ 220	坍落度仪
	2	混合料充盈系数	≥ 1.0		实际灌注量与理论灌注量的比
	3	桩顶标高	mm	± 200	水准测量
	4	桩位	$\leq 1/5D$ (D 为桩体直径)		用钢尺量
	5	钻孔垂直度	$\leq 1/100$		经纬仪测量
	6	褥垫层夯填度	≤ 0.92		水准测量

17.7 预制桩复合地基

17.7.1 施工前应检验成品桩构造尺寸及外观质量。

17.7.2 施工中应检验接桩质量、锤击及静压的技术指标、垂直度以及桩顶标高等。

17.7.3 施工结束后，应检验桩身完整性，以及单桩与复合地基的承载力。

17.7.4 钢筋混凝土预制桩质量验收标准应符合表 17.7.4-1、表 17.7.4-2 的规定。

表 17.7.4-1 锤击预制桩复合地基质量验收标准

项	序	检查项目	允许值或允许偏差		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	复合地基承载力	不小于设计值		静载试验
	2	单桩承载力	不小于设计值		静载试验或高应变法
	3	桩身完整性	—		低应变法
一般项目	1	成品桩质量	表面平整，颜色均匀，掉角深度小于 10mm，蜂窝面积小于总面积的 0.5%		查产品合格证
	2	桩位	$\leq 1/5D$ (D 为桩体直径)		用钢尺量
	3	电焊条质量	设计要求		查产品合格证
	4	接桩：焊缝质量	设计要求		焊缝检测仪、目测法、超声波或射线探伤
	5	电焊结束后停歇时间	min	≥ 8 (3)	用表计时
	6	上下节平面偏差	mm	≤ 10	用钢尺量
	7	节点弯曲矢高	同桩体弯曲要求		用钢尺量
	8	收锤标准	设计要求		用钢尺量或查沉桩记录
	9	桩顶标高	mm	± 50	水准测量
	10	垂直度	—	$\leq 1/100$	经纬仪测量

注：括号中为采用二氧化碳气体保护焊时的数值。

表 17. 7. 4-2 静压预制桩复合地基质量验收标准

项	序	检查项目	允许值或允许偏差		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	复合地基承载力	不小于设计值		静载试验
	2	单桩承载力	不小于设计值		静载试验或高应变法
	3	桩身完整性	—		低应变法
一般项目	1	成品桩质量	表面平整，颜色均匀，掉角深度小于 10mm，蜂窝面积小于总面积的 0. 5%		查产品合格证
	2	桩位	$\leq 1/5D$ (D 为桩体直径)		用钢尺量
	3	电焊条质量	设计要求		查产品合格证
	4	接桩：焊缝质量	设计要求		焊缝检测仪、目测法、超声波或射线探伤
	5	电焊结束后停歇时间	min	≥ 6 (3)	用表计时
	6	上下节平面偏差	mm	≤ 10	用钢尺量
	7	节点弯曲矢高	同桩体弯曲要求		用钢尺量
	8	终压标准	设计要求		现场实测或查沉桩记录
	9	桩顶标高	mm	± 50	水准测量
	10	垂直度	$\leq 1/100$		经纬仪测量
	11	混凝土灌芯	设计要求		查灌注量

注：括号中为采用二氧化碳气体保护焊时的数值。

附录 A 地基与基础工程验槽（规范性）

A.1 一般规定

A.1.1 勘察、设计、监理、施工、建设等相关各方应共同参加验槽。

A.1.2 验槽时，现场应具备岩土工程勘察报告、地基基础设计文件、地基处理施工质量检测报告等。

A.1.3 设计对地基检验有专门要求时，应按设计文件要求进行。

A.1.4 验槽应在复合地基开挖至设计标高后进行，对留置保护层时其厚度不应超过 100mm。

A.1.5 遇到下列情况之一时，应进行专门施工勘察：

1 工程地质与水文地质条件复杂，出现详勘阶段难以查清的问题时；

2 发现土质、地层结构与勘察资料不符时；

3 施工中地基土受严重扰动，天然承载力减弱，需进一步查明其性状及工程性质时；

4 开挖后发现需要增加地基处理或改变基础型式，已有勘察资料不能满足需求时；

5 施工过程中出现新的岩土工程或工程地质问题，已有勘察资料不能充分判别新情况时。

A.1.6 进行了施工勘察，验槽要结合详勘和施工勘察成果进行。

A.1.7 验槽完毕填写验槽记录或检验报告，对存在的问题或异常情况提出处理意见。

A.2 天然地基验槽

A.2.1 天然地基验槽应检验下列内容：

- 1 根据勘察、设计文件核对基槽的位置、平面尺寸、坑底标高；
- 2 根据勘察报告核对基槽底、坑边岩土体和地下水情况；
- 3 检查空洞、古墓、暗沟、防空掩体及地下埋设物的情况，并查明其位置、深度和性状；
- 4 检查基槽底土质扰动的范围和程度等情况；
- 5 检查基槽底土质受冰冻、干裂、水冲刷或浸泡等扰动情况，并查明影响范围和深度。

A.2.2 直接观察时可用袖珍式贯入仪或其他手段作为验槽辅助。

A.2.3 天然地基验槽前可对地基进行轻型动力触探检验，检验数据作为验槽依据。轻型动力触探应检查下列内容：

- 1 地基持力层的强度和均匀性；
- 2 浅埋软弱下卧层或浅埋突出硬层；
- 3 浅埋的会影响地基承载力或稳定性的古墓、墓穴和空洞等；
- 4 轻型动力触探宜采用机械自动化实施，检验完毕后，触探孔处应填充密实。

A.3 地基处理工程验槽

A.3.1 对于换填垫层与压实地基、夯实地基，应现场检查处理

后的地基均匀性、密实度等检测报告和承载力检测资料。

A.3.2 对于桩体复合地基，应现场检查桩位、桩头、桩间土情况和复合地基施工质量检测报告。

A.3.3 经过地基处理的地基承载力和沉降特性，应以处理后的检测报告为准。



附录 B 处理后地基静载试验要点（规范性）

B.0.1 本试验要点适用于确定换填垫层与压实地基、夯实地基、预压地基等处理后地基承压板压力主要影响范围内土层的承载力和变形参数。

B.0.2 平板静载试验采用的压板面积应按需检验土层的厚度确定，且不应小于 1.0m^2 ，对夯实地基，不宜小于 2.0m^2 。

B.0.3 试验基坑宽度不应小于承压板宽度或直径的 3 倍。应保持试验土层的原状结构和天然湿度。宜在拟试压表面用粗砂或中砂找平，其厚度不超过 20mm。基准梁及加荷平台支点（或锚桩）宜设在试坑以外，且与承压板边的净距不应小于 2m。

B.0.4 加荷分级不应少于 8 级，最大加荷量不应小于设计要求承载力特征值的 2 倍。

B.0.5 每级加荷后，按间隔 10min、10min、10min、15min、15min，以后为每隔 0.5h 测读一次沉降量，当在连续 2h 内，每小时的沉降量小于 0.1mm 时，则认为已趋稳定，可加下一级荷载。

B.0.6 出现下列情况之一时，可终止加荷，当满足前三情况之一时，其对应的前一级荷载定为极限荷载：

- 1 承压板周围的土明显地侧向挤出；
- 2 沉降 s 急骤增大，压力-沉降曲线出现陡降段；
- 3 在某一级荷载下，24h 内沉降速率不能达到稳定标准；
- 4 承压板的累计沉降量已大于其宽度或直径的 6%。

B.0.7 处理后的地基承载力特征值确定应符合下列规定：

1 当压力-沉降曲线上有比例界限时，取该比例界限所对应的荷载值。

2 当极限荷载小于对应比例界限的荷载值的 2 倍时，取极限荷载的一半。

3 当不能按上述两款要求确定时，可取 $s/b = 0.01$ 所对应的荷载，但其值不应大于最大加载量的一半；承压板的宽度或直径大于 2m 时，按 2m 计算。

注：s 为静载试验承压板的沉降量；b 为承压板宽度或直径。

4 同一土层参加统计的试验点不应少于 3 点，各试验实测值的极差不超过其平均值的 30% 时，取该平均值作为处理地基的承载力特征值。当极差超过平均值的 30% 时，应分析极差过大的原因，需要时应增加试验数量并结合工程具体情况确定处理后的地基承载力特征值。

WHCIA

附录 C 复合地基静载试验要点（规范性）

C.0.1 本试验要点适用于单桩复合地基静载试验和多桩复合地基静载试验。

C.0.2 复合地基静载试验用于测定承压板下应力主要影响范围内复合土层的承载力。复合地基静载试验承压板应具有足够刚度。单桩复合地基静载试验的承压板可用圆形或方形，面积为一根桩承担的处理面积；多桩复合地基静载试验的承压板可用方形或矩形，其尺寸按实际桩数所承担的处理面积确定。单桩复合地基静载试验桩的中心（或形心）应与承压板中心保持一致，并与荷载作用点重合。

C.0.3 试验应在桩顶设计标高进行。承压板底面以下宜铺设粗砂或中砂垫层，垫层厚度可取 100mm ~ 150mm。如采用设计的垫层厚度进行试验，试验承压板的宽度对独立基础和条形基础应采用基础的设计宽度，对大型基础试验有困难时应考虑承压板尺寸和垫层厚度对试验结果的影响。垫层施工的夯填度应满足设计要求。

C.0.4 试验标高处的试坑宽度和长度不应小于承压板尺寸的 3 倍。基准梁及加荷平台支点（或锚桩）宜设在试坑以外，且与承压板边的净距不应小于 2m。

C.0.5 试验前应采取防水和排水措施，防止试验场地地基土含水量变化或地基土扰动，影响试验结果。

C.0.6 加荷等级可分为 8 级 ~ 12 级，最大加荷量不应小于设计要求承载力特征值的 2 倍。

C.0.7 每加一级荷载前后均应各读记承压板沉降量 1 次，此后每 0.5h 读记一次。当 1h 内沉降量小于 0.1mm 时，即可加下一级荷载。

C.0.8 出现下列情况之一时，可终止加荷：

- 1 沉降急剧增大，土被挤出或承压板周围出现明显的隆起；
- 2 承压板的累计沉降量已大于其宽度或直径的 6%；
- 3 达到极限荷载，而最大加载力已大于设计要求压力的 2 倍。

C.0.9 卸荷级数可为加荷级数的一半，等量进行，每卸一级，间隔 0.5h，读记回弹量，待卸完全部荷载后间隔 3h 读记总回弹量。

C.0.10 复合地基承载力特征值的确定应符合下列规定：

1 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的 2 倍时，可取极限荷载的一半。

2 当压力-沉降曲线是平缓的光滑曲线时，可按相对变形值确定，并应符合下列规定：

- a) 对 CFG 桩或素混凝土桩复合地基，对以卵石、圆砾、密实粗砂为主的地基，可取 s/b 或 s/d 等于 0.008 所对应的压力；对以黏性土、粉土为主的地基，可取 s/b 或 s/d 等于 0.01 所对应的压力。
- b) 对水泥土搅拌桩或旋喷桩复合地基，可取 s/b 或 s/d 等于 0.006 ~ 0.008 所对应的压力，桩身强度大于 1.0MPa 且桩身质量均匀时可取高值。
- c) 对有经验的地区，可按当地经验确定相对变形值，但原地基土为高压缩性土层时，相对变形值的最大值不

应大于 0.015。

- d) 复合地基荷载试验，当采用边长或直径大于 2m 的承压板进行试验时， b 或 d 按 2m 计。
- e) 按相对变形值确定的承载力特征值不应大于最大加载压力的一半。

注： s 为静载试验承压板的沉降量； b 和 d 分别为承压板宽度和直径。

C.0.11 试验点的数量不应少于 3 点，当满足其极差不超过平均值的 30% 时，可取其平均值为复合地基承载力特征值。当极差超过平均值的 30% 时，应分析离差过大的原因，需要时应增加试验数量，并结合工程具体情况确定复合地基承载力特征值。



附录 D 复合地基增强体单桩静载 试验要点（规范性）

D.0.1 本试验要点适用于复合地基增强体单桩竖向抗压静载试验。

D.0.2 试验应采用慢速维持荷载法。

D.0.3 试验提供的反力装置可采用锚桩法或堆载法，采用堆载法加载时应符合下列规定：

- 1 堆载支点施加于地基的压力不宜超过地基承载力特征值；
- 2 堆载的支承位置以不对试桩和基准桩的测试产生较大影响确定，无法避开时应采取有效措施；
- 3 堆载量大时，可利用工程桩作为堆载支点；
- 4 试验反力装置的承重能力应满足试验加载要求。

D.0.4 堆载支点以及试桩、锚桩、基准桩之间的中心距离应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的规定。

D.0.5 试压前应对桩头进行加固处理，CFG 桩等强度高的桩，桩顶宜设置带水平钢筋网片的混凝土桩帽或采用钢护筒桩帽，其混凝土宜提高强度等级并采用早强剂。桩帽高度不宜小于 1 倍桩的直径。

D.0.6 桩帽下复合地基增强体单桩的桩顶标高及地基土标高应与设计标高一致，加固桩头前应凿成平面。

D.0.7 百分表架设位置宜在桩顶标高位置。

D.0.8 开始试验的时间、加荷分级、测读沉降量的时间、稳定标准及卸荷观测等应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规

范》GB 50007 的有关规定。最大加荷量不应小于设计要求承载力特征值的 2 倍。

D.0.9 出现下列情况之一时，可终止加荷：

1 当荷载-沉降（ $Q-s$ ）曲线上有可判定极限承载力的陡降段，且桩顶总沉降量超过 40mm；

2 $\frac{\Delta S_{n+1}}{\Delta S_n} \geq 2$ ，且经 24h 沉降尚未稳定；

3 桩身破坏，桩顶变形急剧增大；

4 桩长超过 25m， $Q-s$ 曲线呈缓变形时，桩顶总沉降量大于 60mm ~ 80mm；

注： ΔS_n ——第 n 级荷载的沉降增量； ΔS_{n+1} ——第 $n+1$ 级荷载的沉降增量。

D.0.10 单桩竖向抗压极限承载力的确定应符合下列规定：

1 作荷载-沉降（ $Q-s$ ）曲线和其他辅助分析所需的曲线；

2 曲线陡降段明显时，取相应于陡降段起点的荷载值；

3 当出现本规程 D.0.9 第 2 款的情况时，取前一级荷载值；

4 $Q-s$ 曲线呈缓变形时，取桩顶总沉降量 s 为 40mm 所对应的荷载值；

5 按上述方法判断有困难时，可结合其他辅助分析方法综合判定；

6 试验点的数量不应少于 3 点，当满足其极差不超过平均值的 30% 时，可取其平均值为复合地基承载力特征值。当极差超过平均值的 30% 时，应分析离差过大的原因，需要时应增加试验数量，并结合工程具体情况确定复合地基承载力特征值。

D.0.11 单桩竖向抗压极限承载力除以安全系数 2，为单桩竖向抗压承载力特征值。

附录 E 预应力管桩复合地基 (资料性)

E.0.1 探讨主要采用及参考规范:

- 1 《建筑地基基础设计规范》GB 50007;
- 2 《复合地基技术规范》GB/T 50783;
- 3 《公路路基设计规范》JTG D30;
- 4 《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31 -02;
- 5 《建筑地基处理技术规范》JGJ 79;
- 6 《建筑桩基技术规范》JGJ 94;
- 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 《城市道路路基设计规范》CJJ 194;
- 10 《建筑地基基础技术规范》DB42/T 242;
- 11 《地基基础设计标准》DGJ 08 -11。

E.0.2 根据上述规范和标准及相关工程经验,经过探讨,得出如下结论:

- 1 管桩作为复合地基增强体时,应是摩擦型桩;
- 2 摩擦型管桩可以作为复合地基使用,也可以作为桩基础使用;
- 3 端承型桩宜作为桩基础使用,不宜作为复合地基增强体使用;
- 4 管桩作为桩基础处理道路路基时,可采用桩板结构或桩网结构,此时桩、板、帽或筏均应满足相关计算及构造要求;

- 5 管桩作为复合地基增强体时，可采用桩网结构；
- 6 管桩作为复合地基增强体时，单桩承载力按照复合地基理论及公式计算；
- 7 管桩作为桩基础时，按照桩基础理论计算。需要计算负摩擦力时，对于摩擦型桩不计中性点以上负摩擦力；对于端承桩，需要计算中性点以上负摩擦力，即下拉荷载；
- 8 管桩作为复合地基增强体或采用桩基础桩网结构处理道路路基时，桩顶以上覆土厚度需满足形成土拱效应的最小厚度要求；
- 9 减沉复合疏桩基础，即减沉桩的概念仅在《建筑桩基技术规范》JGJ 94 出现，道路路基设计时可不采用，可以比较计算沉降；
- 10 有关道路沉降计算，相关规范有明确规定，可参照执行；道路稳定性计算，规范有规定，但有争议，比较复杂；
- 11 道路路基处理采用钢筋混凝土灌注桩时，相关理论、方法与上述管桩相同；道路路基处理采用 CFG 桩及低标号素混凝土桩时，可采用复合地基的相关理论、方法。

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，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 条文中指明应按照其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

WHCIA

引用标准名录

- 1 《建筑施工现场界环境噪声排放标准》 GB 12523
- 2 《建筑地基基础设计规范》 GB 50007
- 3 《混凝土结构设计标准》 GB 50010
- 4 《建筑地基基础工程施工质量验收标准》 GB 50202
- 5 《土工合成材料应用技术规范》 GB/T 50290
- 6 《复合地基技术规范》 GB/T 50783
- 7 《建筑地基基础工程施工规范》 GB 51004
- 8 《建筑与市政施工现场安全卫生与职业健康通用规范》
GB 55034
- 9 《市政工程勘察规范》 CJJ 56
- 10 《建筑垃圾处理技术标准》 CJJ/T 134
- 11 《城市道路路基设计规范》 CJJ 194
- 12 《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》 CJJ/T 177
- 13 《建筑地基处理技术规范》 JGJ 79
- 14 《建设工程施工现场环境与卫生标准》 JGJ 146
- 15 《刚-柔性桩复合地基技术规程》 JGJ 210
- 16 《劲性复合桩技术规程》 JGJ/T 327
- 17 《建筑地基检测技术规范》 JGJ 340
- 18 《公路路基设计规范》 JTG D30
- 19 《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》 JTG/T D 31 -02
- 20 《公路路基施工技术规范》 JTG/T 3610
- 21 《水电工程软弱土地基处理技术规范》 NB/T 10343
- 22 《铁路工程地基处理技术规程》 TB 10106

团体标准

城市道路软弱土地基处理技术规程

T/WHCIA-1008—2025

条文说明





WHCIA

目 次

3	基本规定	95
4	工程勘察与环境调查	97
4.2	工程勘察	97
5	沉降与稳定计算	98
5.1	一般规定	98
5.4	桩体复合地基承载力计算	98
6	换填垫层与压实地基	103
6.2	设计	103
6.3	施工	104
7	夯实地基	105
7.3	施工	105
7.4	质量控制与检测	106
8	预压地基	107
8.1	一般规定	107
10	高压旋喷桩复合地基	109
10.3	施工	109
13	多向加芯搅拌桩复合地基	110
14	环境影响因素与保护措施	112
14.2	环境影响因素	112
15	施工安全与环保	113



WHCIA

3 基本规定

3.0.1 城市道路一般分布有雨水、污水、电力、电信等诸多地下管涵，因此对于城市快速路、主干路的一般路段工后沉降仍控制在 0.20m 以内。若快速路、主干路没有或较少分布雨水、污水、电力、电信等地下管涵，一般路段工后沉降可适当放宽，可控制在 0.30m 以内；同理，对于分布有较多雨水、污水、电力、电信等地下管涵的城市次干路、支路，一般路段工后沉降宜适当从严，宜控制在 0.30m 以内。

3.0.2 本条指出了城市道路软弱土地基处理方法确定的原则。对于某一具体工程，主要有以下两方面的工作：结合路堤高度、工程地质条件与周边环境等因素分段设计地基处理；根据道路断面型式、道路地下管线分布等情况分区设计。对于存在地下管线的城市道路，应综合考虑地下管线与道路地基处理。

水泥土桩复合地基横断面图可参考图 1，预制桩复合地基横断面图可参考图 2。

3.0.4 桥台、涵洞、箱涵、通道等构筑物相对刚性，其沉降要求往往与道路不同，一般比道路要求高，因此与之相邻的道路应采取地基处理等措施尽量减小差异沉降。横穿道路的涵洞、箱涵或通道基坑肥槽范围的路堤宜采用易密实的混凝土、轻质土、固化流态土或级配砂石料进行回填；采用土体回填且不易压实时宜对回填土体进行加固处理。

3.0.7 改扩建道路的帮宽范围与既有道路范围之间易产生不均匀沉降和差异沉降，应对既有道路进行监测与检测，并对帮宽范围进行必要的地基处理，帮宽处根据需要采取必要的衔接措施，尽量消除不均匀沉降和差异沉降。

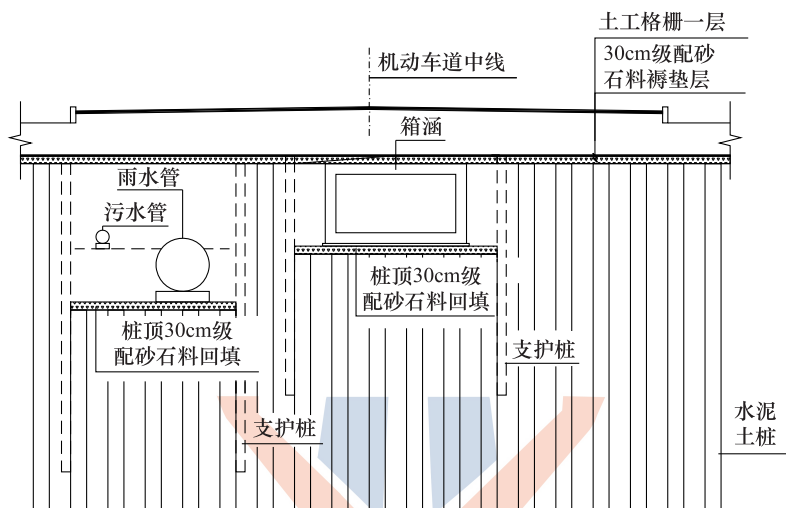


图1 水泥土桩复合地基横断面图

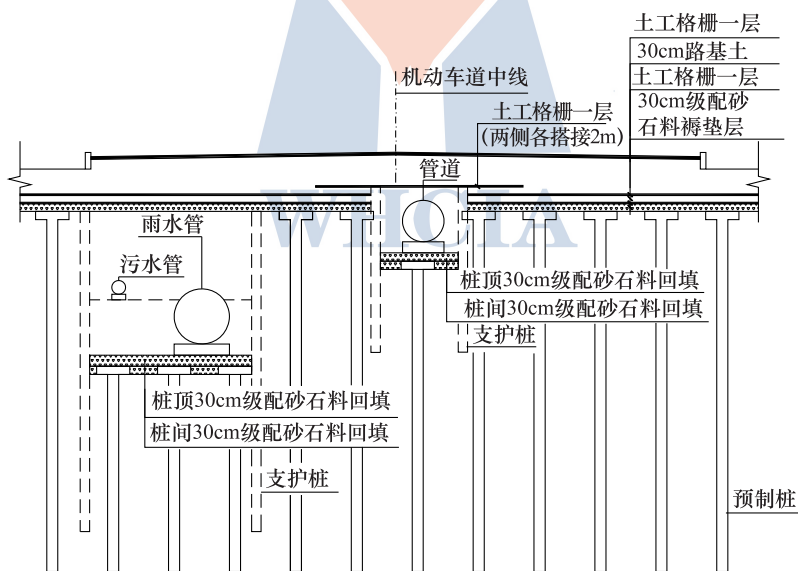


图2 预制桩复合地基横断面图

4 工程勘察与环境调查

4.2 工程勘察

4.2.3 为满足沉降计算需求，需要深层地基处理的道路沿纵向每 300m 长度宜至少有 1 个勘探孔到达厚层坚硬黏性土、碎石土或岩层，深层地基处理的道路长度小于 300m 时，宜有 1 个勘探孔到达厚层坚硬黏性土、碎石土或岩层。

A large, light blue watermark logo is centered on the page. It features a stylized 'W' shape composed of four triangular segments, with the letters 'WHCIA' printed in a bold, sans-serif font directly beneath it.

WHCIA

5 沉降与稳定计算

5.1 一般规定

5.1.4 软弱土地基的稳定性计算应考虑行车动荷载，一般按照 1m 土重进行等效计算；路堤高度小于或等于 2.5m 时，应考虑行车动荷载对沉降的影响。

5.4 桩体复合地基承载力计算

5.4.1 水泥土搅拌桩桩身强度折减系数探讨

混凝土强度折减与混凝土强度进行比较分析，能够更为清晰地探讨水泥土搅拌桩桩身强度折减系数。

混凝土立方体抗压强度标准值用 $f_{cu,k}$ 表示。

《混凝土结构设计标准》GB 50010 规定：混凝土立方体抗压强度标准值系指按照标准方法制作养护的边长为 150mm 的立方体试件，在 28d 龄期用标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度。

《混凝土强度检验评定标准》GB 50107 规定：立方体抗压强度标准值系指对按标准方法制作和养护的边长为 150mm 的立方体试件，在 28d 龄期，用标准试验方法测得的抗压强度总体分布中的一个值，强度低于该值的概率不应大于 5%。

《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 规定：混凝土立方体抗压强度标准值当试件尺寸为 100mm 立方体或骨料最大粒径 ≤ 31.5 mm 时，应乘以强度尺寸换算系数 0.95。当试件尺

寸为 200mm 立方体或骨料最大粒径 $\leq 63\text{mm}$ 时，应乘以强度尺寸换算系数 1.05。

《混凝土力学性能试验方法标准》GB 50081 规定：试件的养护条件当采用标准养护的试件，应在温度在 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 95% 以上的标准养护室中养护，或在温度在 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的不流动的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和溶液中养护。

综上，C30 就表示该批混凝土立方体抗压强度标准值 $f_{\text{cu},k}$ 是以 150mm 边长的混凝土立方体试件在 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 95% 以上的标准养护室中养护，或在温度在 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的不流动的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和溶液中养护 28d 测得的混凝土抗压强度为 $30\text{N}/\text{mm}^2$ 或 30MPa，此抗压强度具有 95% 概率的保证。如果不是标准尺寸需要乘以相应的尺寸换算系数。

《混凝土结构设计标准》GB50010 规定：

$$f_{\text{ck}} = 0.88\alpha_{\text{c1}}\alpha_{\text{c2}}f_{\text{cu},k} \quad (1)$$

$$f_{\text{c}} = f_{\text{ck}}/\gamma_{\text{c}} = f_{\text{ck}}/1.4 \quad (2)$$

式中： f_{ck} ——混凝土轴心抗压强度标准值（MPa）；

α_{c1} ——棱柱强度与立方体强度之比值，对 C50 及以下的普通混凝土取 0.76，对高强混凝土 C80 取 0.82，中间按照线性插值；

α_{c2} ——C40 以上混凝土的脆性折减系数，对 C40 及以下的混凝土取 1.0，对高强混凝土 C80 取 0.87，中间按照线性插值；

考虑到结构中混凝土强度与试件混凝土强度之间的差异，根据以往的经验，并结合试验数据分析以及参考其他国家的有关规定，对试件混凝土强度修正系数取为 0.88。

混凝土的强度设计值由强度标准值除以混凝土材料分项系数确定。

f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值, γ_c 为混凝土材料分项系数,《混凝土结构设计标准》GB 50010 规定取 1.4。

这表明,对于 C20 其混凝土立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 为 20MPa,混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 为 $20 \times 0.88 \times 0.76 \times 1.0 = 13.4$ MPa。混凝土轴心抗压强度设计值 f_c 为 $13.4/1.4 = 9.6$ MPa。

根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007 规定,对于灌注桩,其工作条件系数 ψ_c 可取 0.6 ~ 0.8。则对 C40 及以下的混凝土灌注桩桩身强度特征值为:

$$\begin{aligned} R_a &= \psi_c A_p f_c = (0.6 \sim 0.8) A_p f_c \\ &= (0.43 \sim 0.57) A_p f_{ck} = (0.29 \sim 0.38) A_p f_{cu,k} \end{aligned} \quad (3)$$

根据上述分析可知, $f_{cu,k}$ 为混凝土试件的立方体抗压强度标准值,标准试件为边长为 150mm 的立方体,当立方体试件边长大于或小于 150mm 时,应乘以一个增大或减小的换算系数。 f_{ck} 为混凝土构件,如梁、板、柱等的轴心抗压强度标准值,其与 $f_{cu,k}$ 的换算关系如公式 (1) 所示,其三项系数主要考虑了结构中混凝土强度与试件混凝土强度之间的差异、结构中棱柱强度与立方体强度之间的差异以及材料脆性问题。 f_c 为混凝土构件,如梁、板、柱等的轴心抗压强度设计值,其与 f_{ck} 的换算关系如公式 (2) 所示,式中混凝土材料分项系数主要是考虑了混凝土材料性能的不确定性, R_a 为混凝土灌注桩桩身强度特征值,其与 f_c 、 f_{ck} 、 $f_{cu,k}$ 的关系如公式 (3) 所示。

对于水泥土搅拌桩,《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—2012 第 7.3.3 条规定其单桩承载力特征值按照桩身强度控制时,

公式为：

$$R_a = \eta f_{cu} A_p = (0.20 \sim 0.25) f_{cu} A_p \quad (4)$$

式中： 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 的立方体在标准养护条件下 90d 龄期的立方体抗压强度平均值（kPa）；

η ——桩身强度折减系数，一般取 0.20 ~ 0.25；

A_p ——桩的截面积（ m^2 ）。

与边长为 150mm 的混凝土立方体试件比较，水泥土试块尺寸几乎减小了一半，因此与混凝土试件比较，至少应乘以 0.9 的换算系数。平均值要换算为标准值，也应乘以一个小于 1 的换算系数，姑且定为 0.9。这样对于水泥土搅拌桩，在公式（3）的基础上可进行如下演变：

$$\begin{aligned} R_a &= \psi_c A_p f_c = (0.29 \sim 0.38) A_p f_{cu,k} \\ &= 0.9 \times 0.9 \times (0.29 \sim 0.38) A_p f_{cu} = (0.23 \sim 0.31) A_p f_{cu} \end{aligned} \quad (5)$$

结构工程中结构混凝土强度与标准试件的强度比约 0.88 已被许多国家的规范采用。然而水泥土搅拌桩为化学的原位的加固方法，灌注桩为物理的置换的加固方法，由于目前水泥土搅拌桩施工工艺和控制方法的局限性，导致水泥土搅拌桩的连续性远不如目前施工工艺及控制方法较为成熟的灌注桩，因此水泥土搅拌桩桩体结构实测强度与标准试件的强度比应小于 0.88，工作条件系数也应偏低，棱柱强度与立方体强度之比值也应小于 0.76。

若上述三项因素综合考虑乘以 0.85 的折减系数，则公式（5）可进一步演变如下：

$$R_a = 0.85 \times (0.23 \sim 0.31) A_p f_{cu} = (0.20 \sim 0.26) A_p f_{cu} \quad (6)$$

这与《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 中的取值，即（4）式中的桩身强度折减系数 0.20 ~ 0.25 接近。

通过上述综合比较分析，水泥土搅拌桩桩身强度折减系数 η 按照规范取值是可行的，同时其取值与土层性质及龄期无关，土层及龄期有差异时，差别在于 f_{cu} ，而不是 η 。

土层对桩体的摩阻力特征值 q_{si} 主要与土层性质、桩体类型关联，可通过现场试验，并结合当地经验获得。无试验和经验时，对于淤泥，水泥土搅拌桩、高压旋喷桩可取 4kPa ~ 6kPa，CFG 桩、素混凝土桩可取 5kPa ~ 7kPa，对于预制桩可取 6kPa ~ 8kPa；对于淤泥质土，水泥土搅拌桩、高压旋喷桩可取 5kPa ~ 10kPa，CFG 桩、素混凝土桩可取 6kPa ~ 8kPa，对于预制桩可取 7kPa ~ 9kPa；对于软塑状黏性土，水泥土搅拌桩、高压旋喷桩可取 8kPa ~ 12kPa，CFG 桩、素混凝土桩可取 10kPa ~ 18kPa，对于预制桩可取 12kPa ~ 20kPa。

WHCIA

6 换填垫层与压实地基

6.2 设 计

6.2.2 换填垫层的承载力、压缩模量和压实标准可参考表 1 确定。

表 1 各种垫层的承载力、压缩模量和压实标准

施工 方法	换填材料	承载力特征值 f_{ak}/kPa	压实 系数 λ_c	压缩模量 E_{s1-2}/MPa
碾压、 振密 或夯实	碎石	200 ~ 300	≥ 0.97	13 ~ 22
	砂夹石（其中碎石占 全重的 30% ~ 50%）	200 ~ 250		12 ~ 20
	土夹石（其中碎石占 全重的 30% ~ 50%）	150 ~ 200	≥ 0.97	7 ~ 14
	中粗砂、砾砂、圆砾、角砾	150 ~ 200	≥ 0.95	7 ~ 13
	粉质黏土	130 ~ 200	≥ 0.95	6 ~ 11
	灰土、水泥土	200 ~ 250		10 ~ 16
	建筑砖块及混凝土块	120 ~ 150		6 ~ 10

注：1 压实系数 λ_c 为土的控制干密度 ρ_d 与最大干密度 $\rho_{\max}$ 的比值；土的最大干密度宜采用击实试验确定；碎石或卵石的最大干密度可取 $2.1\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.2\text{g}/\text{cm}^3$ ；

2 表中压实系数 λ_c 系使用轻型击实试验测定土的最大干密度 $\rho_{\max}$ 时给出的压实控制标准；采用重型击实试验时，对粉质黏土、灰土、水泥土及其他材料压实标准应为压实系数 $\lambda_c \geq 0.94$ 。

6.2.8 对于粉质粘土和灰土现场可控制含水量在最优含水量

$\pm 2\%$ 的范围内；使用振动碾压时，可适当放宽下限范围值，最优含水量控制在 $-4\% \sim +2\%$ 范围内。粉煤灰垫层的施工含水量宜控制在最优含水量 $\pm 4\%$ 的范围内。

6.3 施 工

6.3.2 初步设计可按表 2 选用。冲击碾压处理深度不宜大于 3m，振动碾压处理深度不宜大于 2m。

表 2 填土每层铺填厚度及压实遍数

施工设备	每层铺填厚度/mm	每层压实遍数
平碾（8t~12t）	200~300	6~8
羊足碾（5t~16t）	200~350	8~16
振动碾（8t~15t）	500~1200	6~8
冲击碾压 （冲击势能 15kJ~25kJ）	600~1500	20~40

WHCIA

7 夯实地基

7.3 施 工

7.3.1 路基夯实设备应能满足技术标准要求，保证施工质量和效率。首先，需根据工程项目的具体需求，选择具有相匹配的夯击能力和压实效果的设备型号。其次，设备应具备较强的地形适应能力 and 作业稳定性，在松软或承载能力较低的场地上应能保持稳定作业。此外，设备的夯锤重量、冲击力、提升高度以及控制系统的稳定性和耐久性也是重要的考量因素，需根据施工地基的类型和加固要求进行选择。同时，设备的品牌、售后服务和配件供应情况也不容忽视，以利施工便利性和可靠性。

7.3.2 应根据设计与规范要求要求进行夯实试验。施工前要测量夯锤落距，通过检测不同夯击能、不同夯击次数下不同深度的干密度、地基承载力等参数来验证夯实效果。

试夯应根据设计要求及地基复杂程度、土质均匀性和建筑物类别等因素综合确定。应测量每个夯点每夯击 1 次的夯沉量。试夯结束后，可从夯前原地面至其下 2.5m ~ 4.0m 范围每隔一定深度取土样进行干密度等指标检测，必要时进行静载试验或其他检测。夯击次数和最后 2 击的平均夯沉量，应按试夯结果或试夯记录绘制的夯击量的关系曲线确定。

根据夯实试验确定夯点的布置及间距、有效加固深度、单击夯击能、夯击遍数、处理范围等参数用来指导现场施工。

7.3.3 夯实主要施工程序：①清理、平整场地→②现场标出第

一遍夯点位置、测量场地高程→③起重机就位、夯锤对准夯点位置→④测量夯前锤顶高程→⑤将夯锤吊到预定高度脱钩自由下落进行夯击，测量锤顶高程→⑥反复夯击，按确定夯击数及控制标准，完成一个夯点的夯击→⑦重复以上工序，完成第一遍全部夯点的夯击→⑧用推土机将夯坑填平，测量场地高程→⑨在规定的间隔时间后，按上述程序逐次完成全部夯实遍数→⑩用低能量满夯，将场地表层松土夯实，并测量夯后场地高程。

7.4 质量控制与检测

7.4.2 施工结束后宜间隔一定时间后进行质量竣工验收。采用夯实处理地基时，对碎石土和砂土地基间隔时间宜取 7d ~ 14d；粉土和黏性土地基宜取 14d ~ 28d；素填土和杂填土宜按其主要成分所属的土类执行。采用夯实置换处理地基宜取 28d。有孔隙水压力测试时，可按孔隙水压力消散 80% 以上时间作为间隔时间。

WHCIA

8 预压地基

8.1 一般规定

8.1.1 对于城市填方道路，由于存在一定的路堤填高，为了加快施工进度，可采用真空-堆载联合预压。

8.1.2 在试验区预压过程中应进行地基竖向变形、侧向位移、孔隙水压力、地下水位等项目的监测并进行原位十字板剪切试验和室内土工试验。根据试验区获得的监测成果分析地基处理效果，对原设计进行验证和修正，以利指导整个场区的设计与施工。

8.1.3 真空预压及真空-堆载联合预压使预压加固范围内的土体向加固区域产生以收缩为主的变形，周围土体因侧向变形而产生张拉裂缝，其影响区域对于淤泥和淤泥质土等软弱土可达到 25m 以内范围。在 10m 范围内影响很大，水平张拉裂缝可达到 3cm ~ 5cm，甚至 10cm；在 10m ~ 25m 范围内影响较大，水平张拉裂缝随着距离的增大逐渐衰减；25m 以外影响甚微。

侧向变形主要为侧向位移和沉降，由于侧向变形可能导致影响区域内的建（构）筑物和地下管线产生侧向和竖向的不均匀变形和沉降。对不均匀变形和沉降较为敏感的建（构）筑物和地下管线可能会产生裂纹、裂缝，甚至倾倒。

因此，对于真空预压及真空-堆载联合预压密封沟边界以外 20m 以内范围分布有建筑物和构筑物，不管其基础是深基础或浅基础，都不宜采用真空预压及真空-堆载联合预压法进行地

基处理。在影响区域设置搅拌桩、旋喷桩等隔离桩对建筑物和构筑物进行保护时，只能减缓不利影响，不能完全消除不利影响。



10 高压旋喷桩复合地基

10.3 施 工

10.3.1 原位工艺性试验，一般不少于 3 根，以检验机具性能及施工工艺中的各项技术参数，包括最佳灰浆稠度、水灰比、钻进和提升速度、搅拌速度、单位时间喷入量等。当成桩质量不满足设计要求时，应调整设计与施工有关参数后，重新进行试验。



WHCIA

13 多向加芯搅拌桩复合地基

多向加芯搅拌桩复合地基在铁路行业有成功应用，目前在城市道路中尚没有应用。采用这项技术，可收集相关应用案例和资料，参考《劲性复合桩技术规程》JGJ/T 327 等相关规范，并进行专家论证。

13.0.6 多向加芯搅拌桩施工工艺一般采用水泥土搅拌 + 静力压芯桩工艺或水泥土搅拌 + 沉管灌注工艺。

1 水泥土搅拌桩施工用水泥浆应搅拌均匀，注入储浆池时应过滤；搅拌头翼片的枚数、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，应保证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。采用二喷四搅时喷浆搅拌下沉速度不宜超过 $1.0\text{m}/\text{min}$ ，芯桩底部至搅拌桩底应充分搅拌。

2 预制混凝土芯桩出厂前应作出厂检查，其规格、批号、制作日期应符合要求；芯桩起吊应平稳；堆放场地应平整坚实，最下层与地面接触的垫木应有足够的宽度和高度；堆放芯桩应稳固。

3 预制混凝土芯桩的静力压芯工序宜在水泥土搅拌桩成桩后 30min 内进行；芯桩插入时垂直度偏差不应超过 0.5% ，在压芯前应复查压桩机械导向架垂直度；预制芯桩接桩可采用预埋钢板焊接。

4 采用水泥土搅拌 + 沉管灌注工艺时，水泥土搅拌同上说明，沉管灌注混凝土芯桩施工宜在水泥土搅拌桩成桩后 30min 内

进行。沉管灌注混凝土芯桩施工沉管时间应通过成桩试验确定，拔管速度宜控制在 $0.6\text{m/min} \sim 0.8\text{m/min}$ ，混凝土充盈系数应大于 1.0；沉管插入时垂直度偏差不应超过 0.5%。



14 环境影响因素与保护措施

城市道路、排水等基础设施建设，经常遇到建筑物（如房屋、学校等）、地上构筑物（如铁塔、桥梁等）以及地下管涵和地下构筑物（如电力、电信、燃气、综合管廊、隧道、地铁等）等这些地上、地下复杂的环境。强夯、强夯置换、预压等地基处理方法对临近环境的影响是很大的；桩体复合地基方法由于施工桩体的机械、设备等装备通常较为庞大、厚重，其本身的重量、运行、腾挪以及成桩施工等都会对地基土特别是软弱土造成很大的扰动、破坏、沉降、隆起、侧移等不利影响，进而可能波及影响周边地上及地下环境。因此城市道路软弱土地基处理工程应该高度关注、重视、甚至保护这些环境。本章较为详细、系统地描述了环境影响因素与保护措施。

14.2 环境影响因素

14.2.3 地基处理工程本身涉及的地质、设计、施工、应急管理 etc 等都有可能是影响地基处理周边环境的重要因素，因此地基处理工程因素和环境自身因素一样，均应属于环境影响因素。

15 施工安全与环保

城市人口密集、环境复杂，地基处理施工过程中应高度重视施工安全以及扬尘、噪声、废弃物等对城市的不利影响。第 14 章规定了对客观存在的环境的保护措施；本章主要针对施工安全以及施工过程中产生的扬尘、噪声、废弃物等不利影响因素，进行了相应规定。

15.2.3 施工现场焚烧废弃物容易引发火灾，燃烧过程中可能产生有毒、有害气体，并造成环境污染。





WHCIA



统一书号:155160 · 5928

定 价: 68.00 元

