

陕西省工程建设标准

低碳固化法处理地基技术规程

**Technical specification for foundation  
treatment with low-carbon solidification  
method**

（征求意见稿）

《低碳固化法处理地基技术规程》编制组

**2025 年 12 月**

## 前 言

根据陕西省住房和城乡建设厅、陕西省市场监督管理局《关于下达 2025 年度工程建设标准制订计划的通知》（陕建发〔2025〕6 号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内相关标准，结合陕西省实际，在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准主要技术内容是：1.总则；2.术语和符号；3.基本规定；4.材料；5.固化土垫层；6.夯实固化土复合地基；7.流态固化土复合地基；8.固化支护桩；9.固化土回填；10.安全与环境保护；11.工程质量验收。

本标准由陕西省住房和城乡建设厅负责归口管理，陕西省建设标准设计站负责日常管理，中煤西安设计工程有限责任公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请反馈至中煤西安设计工程有限责任公司（地址：陕西省西安市雁塔路北段 66 号，邮编：710054，电话：029-85257801，邮箱：276071760@qq.com）

**本标准主编单位：**中煤西安设计工程有限责任公司

中国建筑第八工程局有限公司西北分公司

**本标准参编单位：**西安银鼎科技有限公司

西安公路研究院有限公司

西安建筑科技大学

长安大学

北京工业大学

陕西海山路桥工程有限责任公司

中国能源建设集团西北电力建设工程有限公司

陕西中机岩土工程有限责任公司

机械工业勘察设计研究院有限公司

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

长庆油田（榆林）油气有限公司

中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司

**本标准主要起草人：**吕远强 王国欣 王 真 周永祥 姜海波

赵金刚 徐希娟 刘端峰 耿九光 王海宁

马晓武 李 灿 张 驰 王 斌 李玉兵

孙 劼 谢 莉 马庆伟 王 磊 杨 喆

周英杰 柏 海 许 建 史嘉梁 王海军

赵 成 刘敏辉 王 岩

**本标准主要审查人：**

# 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 .....	6
4 材 料 .....	7
4.1 一般规定 .....	7
4.2 原材料 .....	7
4.3 固化土混合料组成设计 .....	9
5 固化土垫层 .....	12
5.1 一般规定 .....	12
5.2 压实固化土垫层设计 .....	12
5.3 流态固化土垫层设计 .....	15
5.4 施 工 .....	16
5.5 质量检验 .....	18
6 夯实固化土桩复合地基 .....	20
6.1 一般规定 .....	20
6.2 设 计 .....	20
6.3 施 工 .....	25
6.4 质量检验 .....	26
7 流态固化土桩复合地基 .....	28
7.1 一般规定 .....	28
7.2 设 计 .....	28
7.3 施 工 .....	32

7.4 质量检验 .....	35
8 固化土支护桩 .....	38
8.1 一般规定 .....	38
8.2 设计 .....	38
8.3 施工 .....	43
8.4 质量检验 .....	44
9 固化土回填 .....	48
9.1 一般规定 .....	48
9.2 设计 .....	49
9.3 施工 .....	49
9.4 质量检测 .....	53
10 安全与环境保护 .....	58
10.1 一般规定 .....	58
10.2 安全施工 .....	58
10.3 环境保护 .....	59
11 工程检验与验收 .....	60
11.1 一般规定 .....	60
11.2 固化土垫层检测要求 .....	60
11.3 固化土支护桩的检测要求 .....	61
附录 A 流态固化土流动扩展度测试方法 .....	66
附录 B 流态固化土悬浮性测试方法 .....	68
附录 C 流态固化土沉缩比测试方法 .....	70
本标准用词说明 .....	71
引用标准名录 .....	72

# Contents

1 General Provisions .....	1
2 Terms and Symbols .....	2
2.1 Terms .....	2
2.2 Symbols .....	4
3 Basic Requirements .....	6
4 Material .....	7
4.1 General Provisions .....	7
4.2 Raw Materials .....	7
4.3 Composition Design of Solidified Soil Mixture .....	9
5 Solid Soil Cushion Layer .....	12
5.1 General Provisions .....	12
5.2 Design of Compacted And Solidified Soil Cushion Layer .....	12
5.3 Design of Fluidized Solidified Soil Cushion Layer .....	15
5.4 Construction .....	16
5.5 Quality Inspection .....	18
6 Compacted and Solidified Soil Pile Composite Foundation .....	20
6.1 General Provisions .....	20
6.2 Design .....	20
6.3 Construction .....	25
6.4 Quality Inspection .....	26
7 Fluid Solidified Soil Sile Somposite Foundation .....	28
7.1 General Provisions .....	28
7.2 Design .....	28
7.3 Construction .....	32

7.4 Quality Inspection .....	35
8 Solidified Soil Support Pile .....	38
8.1 General Provisions .....	38
8.2 Design .....	38
8.3 Construction .....	43
8.4 Quality Inspection .....	44
9 Solid Soil Backfilling .....	48
9.1 General Provisions .....	48
9.2 Design .....	49
9.3 Construction .....	49
9.4 Quality Inspection .....	53
10 Safety and Environmental Protection .....	58
10.1 General Provisions .....	58
10.2 Safe Construction .....	58
10.3 Environmental Protection .....	59
11 Engineering Inspection and Acceptance .....	60
11.1 General Provisions .....	60
11.2 Testing Requirements for Solidified Soil Cushion Layer .....	60
11.3 Testing Requirements for Solidified Soil Support Piles .....	61
Appendix A Test Method for Flow Expansion of Fluid Solid Soil ...	66
Appendix B Testing Method for Suspension of Fluid Solid Soil .....	68
Appendix C Test Method for Settlement Shrinkage Ratio of Fluid Solid Soil .....	70
Explanation of Vocabulary in This Standard .....	71
List of Reference Standards .....	72





# 1 总 则

**1.0.1** 为规范低碳固化法处理地基工程及场地回填的技术要求，做到技术可行、经济合理、安全可靠、低碳环保，制定本规程。

【条文说明】：“十三五”期间，我国工业资源综合利用取得显著成效，固废基胶凝材料适用技术得到了产业化应用和推广；在国家和地方政策大力倡导工业固废综合利用的背景下，目前尚无固废基胶凝材料（低碳）固化法处理地基的国家或行业标准，鉴于固废基胶凝材料可就地取材进行地基固化处理，或对煤矸石、粉煤灰、建筑垃圾等固废进行固化处理应用于建筑物地基，为了科学、合理的在地基工程中推广使用绿色低碳固化技术，达到低值、零值、负值材料高值化利用，保证工程质量的目的，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于工业与民用建筑、市政工程的基础设施地基处理及场地回填。

**1.0.3** 本规程规定了陕西省低碳固化法处理地基的材料、固化土垫层、夯实固化土桩复合地基、流态固化土桩复合地基、固化土支护桩、固化土回填、安全与环保、质量检验及验收。

【条文说明】：大量室内试验和工程应用证明，采用固废基胶凝材料固化的土体具有良好的施工性能、力学性能、体积稳定性和耐久性，可完全适用于建设工程的地基处理；由于固废基胶凝材料在土体固化中的应用技术与水泥、石灰等掺和剂存在一定差异，其材料的选用范围、配合比设计要点及原则、施工工艺、质量检验等需要重新进行界定、标准化和规范化，以便更好的为工程建设服务；鉴于此，本规程对低碳固化法处理地基的材料选择、配合比设计、性能检验以及固化土垫层、复合地基、桩和场地回填的应用技术做出规定。

**1.0.4** 低碳固化法处理地基除应符合本规程外，尚应符合现行国家、行业和陕西省有关标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术 语

#### 2.1.1 低碳固化法 low-carbon solidification method

通过采用低碳环保的固化材料或技术，对固废、岩土等进行混合改良，以提高工程性能的固化方法。

#### 2.1.2 固废基胶凝材料 cementitious materials based on solid wastes

固废基胶凝材料指以富含活性  $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  等成分的工业固废为主要原料（占比 60% 以上），经加工研磨后与激发剂按照一定比例配制成的低碳水硬性胶凝材料。

#### 2.1.3 压实型固化土 compacted solidified soil

通过机械压实或夯实与固化剂改良相结合形成的土材料，核心是利用压实或夯实减小土体孔隙率、提高密实度，同时借助固废基胶凝材料（如水泥、石灰、工业废料等）的化学反应增强土颗粒间的粘结力，从而获得较高的强度、稳定性和耐久性，适用于对地基或填筑体强度、承载能力有要求的工程场景。

#### 2.1.4 流态型固化土 flowable solidified soil

以土或工矿业废弃物细颗粒为主要基料，加入适量的胶凝材料、必要的添加剂和水，经搅拌设备充分混合均匀，可采用管道输送/泵送，浇筑时可自密实成型，凝结硬化后形成具有一定强度和其他性能的工程材料。

#### 2.1.5 流动扩展度 fluidity of fluid solidified soil mixture

流态固化土混合料从内径 75mm、高 150mm 的圆柱形测试筒中坍落后扩展形成饼状体的直径。

#### 2.1.6 再生粗骨料/细骨料 recycled coarse/fine aggregate

由建筑垃圾、矸石、弃渣等固废加工而成，粒径大于 4.75mm 的颗粒为再生粗骨料，粒径小于等于 4.75mm 的颗粒为再生细骨料。

#### **2.1.7 固化土垫层 solided soil cushion layer**

固化土垫层是指采用固化剂改良后的土体,经压实或夯实处理后形成的结构层。

#### **2.1.8 夯实固化土桩复合地基 compaction-solidified soil pile composite foundation**

以土料与固废基胶凝材料拌和后分层回填夯实形成的复合地基桩。

#### **2.1.9 流态固化土桩复合地基 flowable solidified soil pile composite foundation**

流态固化土复合地基是指在地基土中布置了流态固化土桩,由流态固化土桩和地基土共同承担上部荷载的地基。

#### **2.1.10 固化土支护桩 solidified soil retaining pile**

以固化土(土料与水泥、石灰等固废基胶凝材料混合固化)为主要材料,通过成桩工艺形成的基坑支护结构,兼具挡土、止水(若采用连续桩墙)功能。固化土支护桩主要包括基坑支护桩及流态土与预应力管桩相结合的劲性复合桩。

## 2.2 符 号

### 2.2.1 抗力和材料性能

$E_{spi}$ ——第  $i$  层复合土体的压缩模量 (kPa) ;

$E_{pi}$ ——第  $i$  层桩体压缩模量 (kPa) ;

$E_{si}$ ——第  $i$  层桩间土压缩模量 (kPa) ;

$f_{cu}$ ——桩体抗压强度平均值 (kPa) ;

$f_{sk}$ ——桩间土地基承载力特征值 (kPa) ;

$f_{spk}$ ——复合地基的承载力特征值 (kPa) ;

$f_{spa}$ ——深度修正后的复合地基承载力特征值 (kPa) ;

$n$ ——桩长范围内所划分的土层数;

$q_{si}$ ——第  $i$  层土的桩侧摩阻力特征值 (kPa) ;

$q_p$ ——桩端土地基承载力特征值 (kPa) ;

$R_a$ ——单桩竖向抗压承载力特征值 (kN) ;

$\gamma_m$ ——基础底面以上土的加权平均重度 (kN/m<sup>3</sup>) , 地下水位以下取有效重度;

$s$ ——复合地基沉降量 (mm) ;

$s_1$ ——复合地基加固区复合土层压缩变形量 (mm) ;

$s_2$ ——加固区下卧土层压缩变形量 (mm) ;

$\Delta p_i$ ——第  $i$  层土的平均附加应力增量 (kPa) ;

$w$ ——土体天然含水率。

### 2.2.2 几何参数

$A_p$ ——单桩截面积 (m<sup>2</sup>) ;

$d$ ——桩体直径 (m) ;

$d_e$ ——单根桩分担的地基处理面积的等效圆直径 (m) ;

$d$ ——基础埋置深度（m）；

$l_i$ ——桩长范围内第  $i$  层土的厚度（m）；

$l_{pi}$ ——桩长范围内第  $i$  层土的厚度（m）；

$m$ ——面积置换率；

$u_p$ ——桩的截面周长（m）。

### 2.2.3 计算系数

$\alpha$ ——桩端土地基承载力折减系数；

$\alpha_p$ ——桩端端阻力发挥系数；

$\beta$ ——桩间土承载力发挥系数；

$\beta_p$ ——桩体竖向抗压承载力修正系数；

$\beta_s$ ——桩间土地基承载力修正系数；

$\eta$ ——桩体强度折减系数；

$k_p$ ——复合地基中桩体实际竖向抗压承载力的修正系数；

$k_s$ ——复合地基中桩间土地基实际承载力的修正系数；

$\lambda$ ——单桩承载力发挥系数；

$\lambda_p$ ——桩体竖向抗压承载力发挥系数；

$\lambda_s$ ——桩间土地基承载力发挥系数；

$\psi_{s1}$ ——复合地基加固区复合土层压缩变形量计算经验系数；

$\psi_{s2}$ ——复合地基加固区下卧土层压缩变形量计算经验系数。

### 3 基本规定

3.0.1 低碳固化法处理地基的材料、设计、施工应符合低碳环保要求。

3.0.2 低碳固化法处理地基的工程用土或固废，其有机质含量不应大于 5%。

3.0.3 低碳固化法处理地基设计前，应具备岩土工程勘察、上部结构及基础设计和场地环境等有关资料。

3.0.4 采用固化法处理地基应根据地下水位埋深、周边环境和下卧层的影响，对场地的适宜性、材料的来源和施工条件分析论证。

3.0.5 低碳固化法处理地基工程应就地取材，充分利用当地土料、弃料或固废等，施工前宜进行配合比设计、室内试验及现场试验，其性能指标应满足设计及现行规范要求。

**【条文说明】：**低碳固化技术的一个重要技术特征和优势在于充分利用当地的土，同时利用当地常见的工业废弃物作为原材料。由于其可利用的材料范围较广，混合料的配制作作为固化土最终性能的基础，需要根据工程可能选取的土料及其土性试验数据、工程设计需要的技术要求，进行固化土配合比的设计和试验。低碳固化法处理地基工程应进行全过程质量控制，并在施工前制定专项施工方案。缺少工程经验的地区应在施工前进行工艺试验，确定工艺可行性和施工控制参数。

3.0.6 夯实固化土桩复合地基和流态固化土桩复合地基上宜设置褥垫层，褥垫层的范围、厚度、材料应根据地基的形式、桩土相对刚度和工程地质条件等因素确定。

3.0.7 地基工程必须进行验槽，验槽检验应符合《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202 附录 A 的相关规定。

3.0.8 地基工程施工应保证安全和重视环境效应，并应遵循信息化施工原则。

## 4 材 料

### 4.1 一般规定

4.1.1 低碳固化法处理地基所用材料应遵循“环保、低碳、经济、高效”的原则，优先选用工业固废资源化产品及低能耗材料。

4.1.2 低碳固化法处理地基所用材料性能应符合工程设计要求和相关标准规定。

4.1.3 低碳固化法处理地基所用材料储存应分类堆放，避免混杂、受潮或污染，运输过程中应采取防雨、防扬尘措施。

4.1.4 低碳固化法处理地基所用材料生产及使用过程中应符合《固体废物污染环境防治法》及《绿色建筑评价标准》GB/T 50378 相关规定。

### 4.2 原材料

4.2.1 低碳固化法处理地基所用胶凝材料技术要求应符合下列规定：

1 固废基胶凝材料的相关技术性能指标应符合表 4.2.1 的规定；

表 4.2.1 固废基胶凝材料技术性能指标

项目	技术要求		试验方法
	压实型固化土	流态型固化土	
细度（80μm方孔筛筛余）/%	≤10	≤10	GB/T 1345
比表面积/（m <sup>2</sup> /kg）	≥350	≥350	GB/T 8074
含水率/%	≤1.0	≤1.0	C J/T 526
初凝时间/min	≥180	≥45	GB/T 1346
终凝时间/min	≤600	≤600	GB/T 1346

2 宜选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。水泥强度等级不应低于 42.5 级，性能应符合《通用硅酸盐水泥》GB 175 有关规定；

3 粉煤灰应满足相关标准对腐蚀性和放射性的要求，技术指标应符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 有关规定。

4.2.2 低碳固化法处理地基所用土料要求应符合下列规定：

1 直接用于低碳固化法地基的用土，包括碎石土、砂砾土、粉土、黏性土

等；

2 改良后土可用于低碳固化法地基的用土，包括干化泥浆、软弱土、淤泥与淤泥质土、泥炭质土等。

4.2.3 低碳固化法处理地基所用再生料由建筑垃圾、矸石、弃渣等固废加工而成的材料用于地基处理应符合《固体废物再生利用污染防治技术导则》HJ1091 有关规定。

【条文说明】：在有充分依据或成功经验时，可采用质地坚硬、性能稳定、透水性强、无腐蚀性和无放射性危害的其他工业废渣材料，但应经过现场试验证明其经济技术效果良好且施工措施完善后方可使用。

4.2.4 低碳固化法处理地基所用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 中的规定。

4.2.5 低碳固化法处理地基所用原材料的检验及储存要求应符合下列规定：

1 胶凝材料应根据批次要求按表 4.2.1 相关指标检测，必要时可按表 4.2.5 项目检测。胶凝材料在运输与贮存过程中应防止包装破损、不得受潮、不得混入杂物。应存放在专用仓库或固定的场所妥善保管，固废基胶凝材料贮存期超过 60d 使用时需重新检验合格后方可使用；

表 4.2.5 胶凝材料检验项目

胶凝材料类型	项目	试验方法
固废基胶凝材料	重金属含量、重金属浸出毒性	CJ/T 526
水泥	氯离子含量、安定性	GB 175
粉煤灰	化学成分、烧失量	GB/T 1596

2 土料应取代表性土样分析，采集、运输及保管方法按照《土工试验方法标准》GB/T 50123 执行，单点取样量满足室内分析试验用量要求。更换土源或土质改变，应重新取样分析。土料取样分析项目包含：天然含水率、颗粒分析、酸碱度（pH 值）、有机质含量、易溶盐总量等，各试验方法按照《土工试验方



法标准》GB/T 50123 执行；

3 再生料应检测杂物含量、吸水率以及放射性等指标，技术指标应符合规范《再生骨料应用技术规程》JGJ/T 240 和《建筑材料放射性核素限量》GB 6566 的要求；

【条文说明】：再生料中塑料、木块、钢筋、纸屑、泡沫颗粒等杂物含量应进行控制，以防止对施工质量控制及后期地基稳定性产生不利影响。

4 水应检测 pH 值、Cl<sup>-</sup>含量、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量、碱含量、可溶物含量和不溶物含量等指标，试验方法按《混凝土用水标准》JGJ 63 执行。

### 4.3 固化土混合料组成设计

4.3.1 根据工程设计要求，固化土混合料可选择压实型固化土或流态型固化土，固化土混合料可采用固废基胶凝材料、水泥或二者复配进行配合比设计。

4.3.2 固化土混合料配合比设计时宜采用质量比，胶凝材料掺量宜采用其占干土料质量的百分比表示。

4.3.3 固化土混合料配合比设计宜采用 7d 或 28d 无侧限抗压强度为初始试验指标。固化土混合料技术指标应符合现行行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 有关规定。

4.3.4 混合料各项性能指标试验、试件制备、成型以及养护等应按《土工试验方法标准》GB/T 50123 和《水泥土配合比设计规程》JG/T 233 的规定执行。

4.3.5 压实型固化土混合料作为地基时，其最佳含水率和最大干密度应通过击实试验确定，试验参照《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定执行。压实型固化土混合料组成设计流程包括原材料检验、室内试验和施工参数确定等，其设计流程见图 4.3.5。

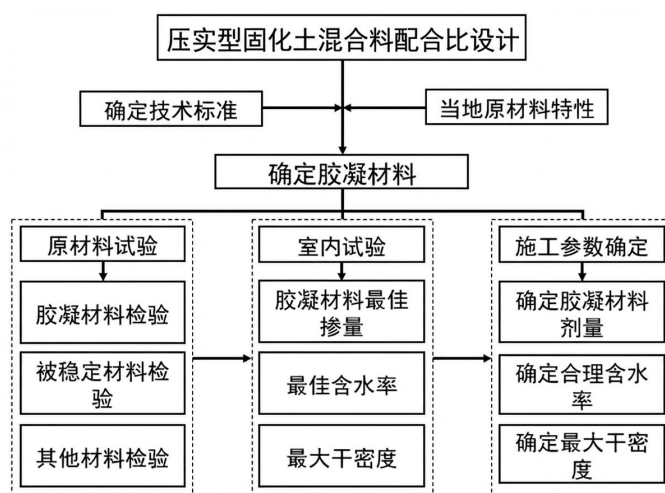


图 4.3.5 压实型固化土混合料配合比设计流程

4.3.6 流态型固化土混合料组成设计流程包括原材料检验、室内试验和施工参数确定等，室内试验包括计算胶凝材料掺量、计算拌合用水量、计算外加剂掺量、流态固化土试配等步骤，其设计流程见图 4.3.6。

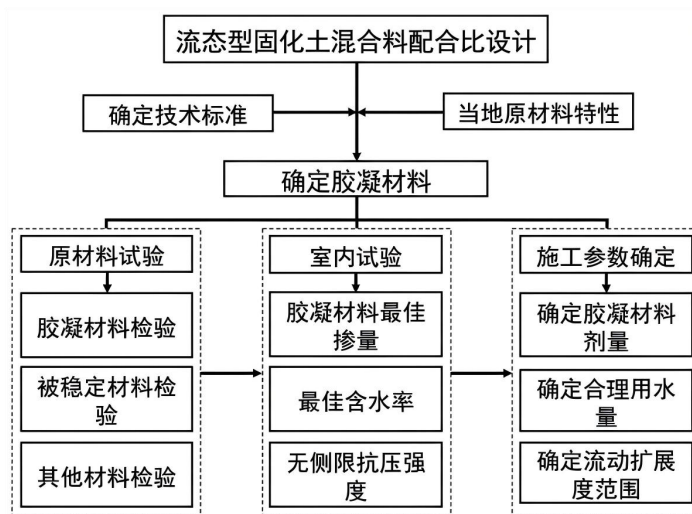


图 4.3.6 流态型固化土混合料配合比设计流程

【条文说明】：采用流态型固化土的地基工程，应以抗压强度作为主要技术指标，并根据工程条件确定流态固化土的密度、流动扩展度、抗压强度及强度测试龄期等设计指标。流态型固化土配合比设计时，应综合考虑流动扩展度、无侧限抗压强度及经济性确定胶凝材料类型及掺量。按照胶凝材料掺量 2% 增减方式分别测试流态固化土 7d 或 28d 抗压强度，以满足设计要求的胶凝材料最小掺

量作为设计胶凝材料掺量。

4.3.7 施工配合比应根据土料的实际含水率等变化对设计配合比进行必要调整后确定。

4.3.8 固化土混合料性能检验应符合下列规定：

- 1 固化土的 7d 或 28d 无侧限抗压强度应符合设计要求，检测方法应按照《水泥土配合比设计规程》JG/T 233 执行；
- 2 固化土混合料组成设计时，应选用不少于 3 个固化材料剂量，分别确定各剂量下混合料的最佳含水率和最大干密度；
- 3 根据试验确定的最佳含水率、最大干密度及压实度要求成型标准试件，进行 7d 或 28d 无侧限抗压强度试验。平行试验的最少试件数量为 6 个，试验结果的变异系数应符合《水泥土配合比设计规程》JG/T 233 附录 B 规定，否则应重新制作试件进行试验；
- 4 土的种类或固化材料的技术指标发生变化时，应重新进行材料组成设计。

## 5 固化土垫层

### 5.1 一般规定

5.1.1 低碳固化土适用于地坪垫层、地基基础垫层、浅层地基原位固化等土体固化。

5.1.2 根据建筑规模、荷载性质、场地地质条件、施工机械及填料性质和来源等综合分析后，进行垫层的设计与施工，并进行现场试验，确定垫层施工质量。根据低碳固化土是否在现场拌制，分为厂拌法与现拌法施工两种。

【条文说明】：根据低碳固化土是否在现场拌制，固化土施工分为厂拌法与现拌法施工两种。厂拌法：在搅拌站集中拌合混合料，适用于大面积道路基层、底基层，需控制运输时间和拌合均匀性。现拌法：现场直接拌合土料与胶凝材料，适用于城市次干路和支路、乡村道路、临时道路、小范围地坪垫层或浅层地基处理，过程中需确保土料与固化剂充分混合。

5.1.3 低碳固化土配合比设计时，可根据工程技术要求加入相应外加剂。外加剂应根据土体性质、工程技术要求和经济合理性选用。土壤固化外加剂的技术性能指标应符合现行行业标准《土壤固化外加剂》CJ/T 486 的有关规定。

5.1.4 垫层的厚度应根据置换土层的深度以及下卧层的承载力确定，宜为0.5m~3.0m。

### 5.2 压实固化土垫层设计

5.2.1 固化土应进行击实试验测定最佳含水率和最大干密度，并应在最大干密度和最佳含水率下成型试件。试验过程应符合现行标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123) 的有关规定。

5.2.2 固化土配合比设计流程应符合《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》JTG E51、以及《土壤固化外加剂》CJ/T 486 等相关标准的规定的有关规定，并应符合下列规定：

1 取工程现场具有代表性的土样进行土工试验。测定以下关键性指标：含水率、液塑限、湿密度、颗粒分析、酸碱度（pH 值）、有机质含量、可溶盐含量等；

2 配制固化土混合料。根据工程用土的种类、道路等级和道路交通荷载等因素，低碳胶凝材料的推荐掺量宜在 3%~9%之间，按照土的干质量计算实际掺量，配制混合料，成型应符合《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》JTGE 51 有关规定；

3 配合比试验。按上述款项 2 确定的配比，选取低碳胶凝材料波动 $\pm 1\%$ 配制不少于 3 组混合料。试件标准养生 7d，最后 1d 浸水；

4 综合考虑无侧限抗压强度、动回弹模量等试验结果，以及工程的经济性、施工可行性等因素，确定低碳胶凝材料的最佳掺量和固化土的最佳配合比。测定各组试件的无侧限抗压强度，对比试验结果确定低碳胶凝材料掺量，此外尚宜考虑动回弹模量。

**【条文说明】：**本规程给出的低碳胶凝材料推荐掺量是结合大量室内试验数据和丰富工程实践经验得出的。在实际工程应用中，由于不同地区的工程地质条件、道路使用要求等存在差异，应根据具体情况，综合考虑道路等级、交通荷载、现场试验数据等因素，对胶凝材料掺量进行合理调整和优化，以确保低碳固化路基土的性能满足工程要求。同时，应严格按照相关标准和规程进行试验和施工，保证工程质量。

5.2.3 低碳固化土强度指标宜采用立方体抗压强度试验测定。抗压强度试件应采用室内制备的尺寸为 70.7mm×70.7mm×70.7mm 的立方体试样。

5.2.4 低碳固化土的压缩性、渗透性和抗剪强度指标宜分别采用压缩试验、渗透试验和剪切试验测定，试件龄期宜选用 90d，并应符合现行行业标准《水泥土配合比设计规程》JGJ/T 233 的有关规定。

【条文说明】有特殊要求的工程，可按现行行业标准《水泥土配合比设计规程》JGJ/T 233 开展压缩试验和直剪试验等。

压缩试验和直剪试验采用环刀试件。试件直径为 61.8mm，高度 20mm；根据试验仪器规格，直剪试验试件高度也可选取 40mm。压缩试验每组平行试件数量为 3 个；直剪试验应制备 3 组共 12 个试件。

5.2.5 低碳固化土强度指标应选用 90d 龄期的固化土抗压强度。当有工程经验时，也可根据 7d 和 28d 龄期的固化土抗压强度，通过经验公式计算 90d 龄期的强度。

【条文说明】：固化土强度指标测定时，应至少进行 7d、28d 和 90d 三种龄期的试验。抗压强度试件采用室内制备的尺寸为 70.7mm×70.7mm×70.7mm 的立方体试样。每组平行试件数量应为 6 个。固化土试块制备与强度试验应符合现行行业标准《水泥土配合比设计规程》JGJ/T 233 中的有关规定。

对于无特殊要求的工程，固化土性能指标以 90d 龄期为准；有特殊要求的工程，应按工程设计要求执行。

5.2.6 室内固化土试样的 90d 无侧限抗压强度，应满足地基目标承载力设计要求，以及关于承载力计算的公式反算得出的固化处理后土体 90d 无侧限抗压强度要求。

5.2.7 地基固化土设计应满足地基承载力、沉降和稳定性要求，并应符合现行国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 的规定。

5.2.8 地基固化土室内配合比试验应按下列步骤进行：

- 1 对原状土进行取样试验，确定土体含水率、液塑限、湿密度、压缩模量及有机质含量等指标，对有特殊要求的，还需增加其他相关指标测试；

- 2 根据原状土种类和性质，确定胶凝材料配合比，再根据无侧限抗压强度

设计要求，确定胶凝材料基准掺量；

3 配合比试验应至少采用 3 组，其中 1 组配合比为基准值，另外 2 组配合比在基准值的基础上分别增加和减少 1%~3% 的胶凝材料用量；

4 完成无侧限抗压强度测试，并进行配合比调整与确定。

【条文说明】：5.2.7、5.2.8 参考现行行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 和《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02 的相关规定，加固土桩采用 90d 无侧限抗压强度作为标准强度。结合就地固化处理经验，就地固化土采用此标准强度，有助于节省工程投资，具备合理性。

实际施工中，90d 的长龄期给室内试验和现场检测带来不便。对此，可采取以下两种解决方法：其一，建立强度增长规律关系式，利用固化土 28d 与 90d 无侧限抗压强度相对稳定的对应关系，通过短龄期强度推测 90d 强度；其二，采用高温快速养生（ $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $\geq 95\%$ ），促使试件在较短时间内达到标准养生（ $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $\geq 95\%$ ）下 90d 的无侧限抗压强度，具体对应关系需经试验确定。

## 5.3 流态固化土垫层设计

5.3.1 生产流态固化土的土料应符合下列规定：

- 1 宜采用当地的工程弃土、建筑垃圾再生料、尾矿、石屑；
- 2 当采用杂填土、壤土、废弃工程泥浆时，应加强预处理和质量控制；
- 3 污染土需经试验验证，满足相关要求后方可使用；
- 4 采用工矿业废弃物替代部分土料时，应进行充分的试验研究，满足设计和环保要求时方可使用。

5.3.2 流态固化土设计应包括材料选择、配合比、龄期强度要求、流动度等内容。

5.3.3 应根据工程的特点和要求，确定与龄期相关的固化土的立方体抗压强度要求作为施工和验收的标准。

5.3.4 根据土体的含水率及计算所得固化剂质量、加水量，进行固化土配制。

5.3.5 在计算配合比的基础上通过试验确定最终配合比。配合比试验应采用搅拌机拌制试样。配合比试验应符合下列规定：

1 应采用不少于 3 种配合比进行试验。其中 1 个应按本标准确定的计算配合比，另外 2 种配合比在计算配合比基础上对固化剂用量进行调整，宜分别增加和减少 3%~5%；

2 每种配合比试验时，拌合物坍落度和扩展度均应满足施工要求；

3 每种配合比至少应制作 1 组标准试件，并在  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  条件下养护至指定龄期；

4 试块应进行指定龄期的强度试验。当强度不满足设计要求时，应分析原因，调整配合比后重新进行强度试验。

5.3.6 根据试验结果、固化土的施工性能要求、造价，综合确定固化土施工配合比。

## 5.4 施 工

5.4.1 固态固化土施工应符合下列规定：

1 固废基胶凝材料应经验收合格后入库保存，材料贮存时不得受潮；

2 固化土所用素土中的有机物含量（质量比）不应超过 5%；土的塑性指数小于 17，施工时土颗粒粒径宜小于 5mm。素土试验结果应满足技术要求。严格控制素土含水率、粒径大小，土质发生变化时应重新进行试验；

3 施工实际使用的胶凝材料掺量应根据施工工艺要求确定，通过室内试验的检验后方可使用；

4 施工前应按设计要求进行现场施工放样，并完成清表、排水及回填找平等场地准备工作；

5 固化土可在工厂预拌，胶凝材料和素土通过拌合机进行拌合，严格控制



胶凝材料掺量，保证拌合均匀；

6 固化土运输所用的容器应保证干净无杂物，应避免固化土受雨淋、日晒等外界环境影响；

7 摊铺前检测下承层弯沉值、压实度和平整度，符合要求后方可施工；

8 固化土可在现场拌合施工，宜采用粉料撒布车进行摊铺，并宜采用路拌机拌和。对原位素土土质不均、出现结块现象的土体，应采用翻松后再固化的方式确保固化均匀，严禁在拌和层底部留有素土夹层；

9 固化土摊铺碾压后应立即覆盖土工布或薄膜，洒水保持湿润，养生期 $\geq 7$ 天，期间仅限洒水车低速通行；

10 基坑开挖时应避免坑底土层受扰动，可保留 180mm~220mm 厚的土层暂不挖去，待施工流态固化土垫层前再由人工挖至设计标高。严禁扰动垫层下的软弱土层，应防止软弱垫层被践踏、受冻或受水浸泡，待垫层施工完毕，达到设计强度后，方可进行上部结构施工。

#### 5.4.2 流态固化土施工应符合下列规定：

1 应按施工方案，组织施工设备进场，并做好设备的安装和调试；

2 应按原材料使用计划，组织原材料进场，并进行复核检验，满足要求后使用；

3 固化土分步浇筑时，模板和支撑的强度、刚度及稳定性应满足受力要求；

4 应根据现场施工场地、工期要求选择合适的制备设备。固化土制备设备包括土的筛分设备、固化剂浆液拌制设备和固化土拌合设备。固化土制备设备应符合下列规定：

（1）搅拌设备的生产能力和设备性能应满足连续作业要求；

（2）搅拌设备应具备固化剂、水及土等材料的计量和拌合的功能；

（3）当现场土料和试验土料含水量不同时，应根据施工土的含水量，确定

实际施工配合比；

(4) 固化土制备可分为两步：先将固化剂与一定量的水拌合成浆液，再将固化剂浆液与土进行拌合；

(5) 固化土可采用现场搅拌直接浇筑，也可在搅拌站集中搅拌，通过混凝土罐车运输到现场进行浇筑出场。

5 固化土的指标除强度外，还包括流动度。当固化土的指标不满足设计要求时，应分析原因，并调整参数重新拌合；

6 浇筑前应根据施工现场的条件确定浇筑的方式，可采用泵送或溜槽方式进行；

7 固化土搅拌至浇筑完成的时间不宜超过 3h；

8 固化土宜采用分层进行浇筑。每层浇筑的厚度应通过核算，首次浇筑厚度不宜超过 0.5m，每次浇筑厚度不宜大于 2m，相邻片区浇筑高差不宜大于 1m；

9 当浇筑基槽底标高不一致时，应按先深后浅的顺序施工。大面积地基垫层浇筑施工时，应分段施工且对称进行；

10 施工中应根据工程所在地的气候环境，确定冬、雨期的起、止时间；冬、雨期施工应加强与气象部门联系，及时掌握气象条件变化，做好防范准备；

11 浇筑时，遇大雨或持续小雨天气时，应对未硬化的填筑体表层进行覆盖，且不应再开新作业段；

12 当采用泵送施工时，出料不得直接冲击地下室外墙和支护结构；

13 填筑体顶层浇筑完后，应对填筑体表面覆盖塑料薄膜或土工布进行保湿养护，养护时间不少于 7d。

## **5.5 质量检验**

5.5.1 压实固化土检验与验收应符合下列规定：

地坪垫层、地基基础垫层、浅层原位固化等施工过程中，应随时对施工质量进行检测，固化土施工质量检测标准应符合表 5.5.1 的规定；

表 5.5.1 固化土施工质量检测标准

项次	项目		检测频率	规定值或允许偏差	检测方法
1	固化材料掺量（ % ）		每天汇总一次，取平均值	设计值的 ±0.5	计算机采集数据计算
2	固化厚度（ mm ）		单个区域或每 200m 测试点不少于 3 处	设计值的 ±200	静力触探或钻孔取样
3	固化宽度（ mm ）			设计值的 ±100	米尺或其他长度量测工具
4	强度	不排水抗剪强度（ kPa ）或静力触探锥尖阻力（ MPa ）	单个区域或每 200m 测试点不少于 3 处	不小于设计要求	十字板剪切试验或静力触探试验
5	承载力（ kPa ）		单个区域或每 200m 测试点不少于 1 处	不小于设计要	荷载板试验

#### 5.5.2 流态固化土检验与验收应符合下列规定：

1 对垫层的施工质量可选用环刀取样、静力触探、轻型动力触探或标准贯入试验等方法进行检验；

2 采用环刀法检验垫层的施工质量时，取样点应选择位于每层垫层厚度的 2/3 深度处。检验点数量，条形基础下垫层每 10m~20m 不应少于 1 个点，独立柱基、单个基础下垫层不应少于 1 个点，其他基础下垫层每 50m<sup>2</sup>~100m<sup>2</sup> 不应少于 1 个点。采用标准贯入试验或动力触探法检验垫层的施工质量时，每分层平面上检验点的间距不应大于 4m；

3 规定值与允许误差及检测方法按表 5.5.1 执行；

4 竣工验收应采用静载荷试验检验垫层承载力，且每个单体工程不宜少于 3 个点；对于大型工程应按单体工程的数量或工程划分的面积确定检验点数。

## 6 夯实固化土桩复合地基

### 6.1 一般规定

6.1.1 夯实固化土桩复合地基适用于在地下水位以上为黏性土、粉土、粉细砂、素填土、杂填土等适合成桩并能挤密的地基。

【条文说明】：夯实固化土桩是介于刚性桩与柔性桩之间具有一定压缩性的半刚性桩，桩身强度越高，其特性越接近刚性桩；反之则接近柔性桩。桩越长，则对桩身强度要求越高。但过高的桩身强度对复合地基承载力的提高及桩间土承载力的发挥是不利的。为了充分发挥桩间土的承载力和复合地基的潜力，应使土对桩的支承力与桩身强度所确定的单桩承载力接近。

6.1.2 夯实固化土桩复合地基可采用沉管、冲击等挤土成孔工艺施工，也可采用洛阳铲、螺旋钻等非挤土成孔工艺施工。

6.1.3 夯实固化土桩复合地基设计前，可根据工程经验，选择固废基胶凝材料、土、水以及其他外加剂配合比，并可初步确定固化土材料的抗压强度设计值。缺乏经验时，应预先进行配合比试验。

### 6.2 设计

6.2.1 夯实固化土桩复合地基的处理深度应根据工程特点、设计要求和地质条件综合确定。初步设计时，处理深度应满足地基主要受力层天然地基承载力计算的需要。

6.2.2 确定夯实固化土桩桩端持力层时，除应符合地基处理设计计算要求外，尚应符合下列规定：

- 1 桩端持力层厚度不宜小于 1.0m；
- 2 应无明显软弱下卧层；
- 3 桩端全断面进入持力层的深度，对碎石土、砂土不宜小于桩径的 0.5 倍，对粉土黏性土不宜小于桩径的 2 倍。

**6.2.3 夯实固化土桩桩的平面布置**,宜综合考虑基础形状、尺寸和上部结构荷载传递特点,并应均匀布置。

夯实固化土桩可布置在基础底面范围内,当地层较软弱、均匀性较差或工程有特殊要求时,可在基础外设置护桩。

**【条文说明】**: 夯实固化土桩是一种具有一定压缩性的柔性桩,在正常置换率的情况下,荷载大部分由桩承担,通过侧摩阻力和端阻力传至深层土中。在桩和土共同承担荷载的过程中,土的高压力区增大,从而提高了地基承载力,减少地基沉降变形,所以在基础边线内布桩,就能满足上部建筑物荷载对复合地基的要求。一般桩边到基础边线的距离宜为 **100mm~300mm**。如果新建场地与即有建筑物相邻,或新建建筑物的基础埋深大于原有建筑物基础深度,或新建建筑物中高低建筑物规模差异大且基础埋深差别大时,可在基础外适量布设护桩。

**6.2.4 夯实固化土复合地基桩径**宜根据施工工具和施工方法确定,宜取 **400mm~600mm**。

**【条文说明】**: 据调查,目前市面上成桩机械最小成孔直径为 **400mm**。

**6.2.5 夯实固化土复合地基**宜按等边三角形或矩形布置,桩中心距可取桩径的 **2.0 倍~3.0 倍**,桩中心距不宜大于桩径的 **5 倍**。

**6.2.6 夯实固化土复合地基桩顶**宜铺设厚度为 **200mm~300mm** 的褥垫层,垫层材料宜选用最大粒径不大于 **20mm** 的中砂、粗砂、石屑、级配砂石等。

**【条文说明】**: 根据夯实固化土复合地基的工作机理,应在夯实固化土桩顶和桩间土的顶部设置一层厚度为 **0.2~0.3m** 砂砾、碎石等组成的散粒垫层,以利将由上部结构基础传递下来的荷载均匀地分配到夯实固化土桩顶部和桩间土的面层,调整桩土荷载分担比,充分发挥桩间土的作用,也可以减少桩对基础底面的应力集中,防止桩对基础可能产生的冲切破坏。散粒垫层所用材料可为中砂、粗砂、石屑、级配砂石等,限制最大粒径一般不超过 **20mm**,垫层的宽度应比

基础略大，其宽出的尺寸不宜小于垫层的厚度。施工时应充分振捣、碾压密实。

6.2.7 初步设计时，由桩周土和桩端土的抗力可能提供的单桩竖向抗压承载力特征值应按公式（6.2.7-1）计算；由桩体材料强度可能提供的单桩竖向抗压承载力特征值应按公式（6.2.7-2）计算，并应取其中较小值。

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (6.2.7-1)$$

$$R_a = \sigma_{ru} K_p A_p \quad (6.2.7-2)$$

式中： $R_a$ ——单桩竖向抗压承载力特征值（kN）；

$A_p$ ——单桩截面积（m<sup>2</sup>）；

$u_p$ ——桩的截面周长（m）；

$n$ ——桩长范围内所划分的土层数；

$q_{si}$ ——第*i*层土的桩侧摩阻力特征值（kPa）；

$l_i$ ——桩长范围内第*i*层土的厚度（m）；

$q_p$ ——桩端土地基承载力特征值（kPa）；

$\alpha$ ——桩端土地基承载力折减系数；

$\sigma_{ru}$ ——桩周土所能提供的最大侧限力（kPa）；

$K_p$ ——被动土压力系数。

【条文说明】：公式(6.2.7-1)中桩端地基承载力折减系数 $\alpha$ 取值与施工时桩端施工质量及桩端土质等条件有关。当桩端为较硬土层时取高值。如果桩底施工质量不好，固化土桩没能真正承在硬土层上，桩端地基承载力不能充分发挥，这时取 $\alpha=0.4$ 。反之，当桩底质量可靠时取 $\alpha=0.6$ ，通常取 $\alpha=0.5$ 。

6.2.8 夯实固化土桩复合地基承载力特征值应通过复合地基竖向抗压载荷试验确定，初步设计时，也可按本规范公式（6.2.8-2）估算。其中 $\beta$ 可取 1.00， $\beta_p$ 采用非挤土成孔时可取 0.80~1.00， $\beta_s$ 采用挤土成孔时可取 0.95~1.10。

$$f_{spk} = k_p \lambda_p m R_a / A_p + k_s \lambda_s (1-m) f_{sk} \quad (6.2.8-1)$$

$$f_{spk} = \beta_p m R_a / A_p + \beta_s (1-m) f_{sk} \quad (6.2.8-2)$$

$$\beta_p = k_p \lambda_p \quad (6.2.8-3)$$

$$\beta_s = k_s \lambda_s \quad (6.2.8-4)$$

$$m = d^2 / d_e^2 \quad (6.2.8-5)$$

式中： $A_p$ ——单桩截面积（ $m^2$ ）；

$R_a$ ——单桩竖向抗压承载力特征值（ $kN$ ）；

$f_{sk}$ ——桩间土地基承载力特征值（ $kPa$ ）；

$d$ ——桩体直径（ $m$ ）；

$d_e$ ——单根桩分担的地基处理面积的等效圆直径（ $m$ ）；

$m$ ——面积置换率， $m = d^2 / d_e^2$ ；等边三角形布桩  $d_e = 1.05s$ ，正方形布桩  $d_e = 1.13s$ ，矩形布桩  $d_e = 1.13\sqrt{s_1 s_2}$ ， $s$ 、 $s_1$ 、 $s_2$ 分别为桩间距、纵向桩间距和横向桩间距；

$k_p$ ——复合地基中桩体实际竖向抗压承载力的修正系数，与施工工艺、复合地基置换率、桩间土的工程性质、桩体类型等因素有关，宜按地区经验取值；

$k_s$ ——复合地基中桩间土地基实际承载力的修正系数，与桩间土的工程性质、施工工艺、桩体类型等因素有关，宜按地区经验取值；

$\lambda_p$ ——桩体竖向抗压承载力发挥系数，反映复合地基破坏时桩体竖向抗压承载力发挥度，宜按地区经验取值；

$\lambda_s$ ——桩间土地基承载力发挥系数，反映复合地基破坏时桩间地基承载力发挥度，宜按桩间土的工程性质、地区经验取值；

$\beta_p$ ——桩体竖向抗压承载力修正系数，宜综合复合地基中桩体实际竖向抗压承载力和复合地基破坏时桩体的竖向抗压承载力发挥度，结合工程经验取值；

$\beta_s$ ——桩间土地基承载力修正系数，宜综合复合地基中桩间土地基实际承

载力和复合地基破坏时桩间土地基承载力发挥度，结合工程经验取值。

6.2.9 夯实固化土桩复合地基的沉降由垫层压缩变形量、加固区复合土层压缩变形量 ( $s_1$ ) 和加固区下卧土层压缩变形量 ( $s_2$ ) 组成。当垫层压缩变形量小，且在施工期已基本完成时，可忽略不计。复合地基沉降可按下式计算：

$$S = s_1 + s_2 \quad (6.2.9)$$

式中： $s_1$ ——复合地基加固区复合土层压缩变形量(mm)；

$s_2$ ——加固区下卧土层压缩变形量(mm)。

6.2.10 复合地基加固区复合土层压缩变形量 ( $s_1$ ) 宜根据复合地基类型分别按下列公式计算：

$$s_1 = \psi_{s1} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i l_i}{E_{spi}} \quad (6.2.10-1)$$

$$E_{spi} = m E_{pi} + (1 - m) E_{si} \quad (6.2.10-2)$$

式中： $\Delta p_i$ ——第  $i$  层土的平均附加应力增量 (kPa)；

$l_i$ ——第  $i$  层土的厚度 (mm)；

$m$ ——复合地基置换率；

$\psi_{s1}$ ——复合地基加固区复合土层压缩变形量计算经验系数，根据复合地基类型、地区实测资料及经验确定；

$E_{spi}$ ——第  $i$  层复合土体的压缩模量 (kPa)；

$E_{pi}$ ——第  $i$  层桩体压缩模量 (kPa)；

$E_{si}$ ——第  $i$  层桩间土压缩模量 (kPa)，宜按当地经验取值，如无经验，可取天然地基压缩模量。

6.2.11 复合地基加固区下卧土层压缩变形量 ( $s_2$ )，可按下式计算：

$$s_2 = \psi_{s2} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i l_i}{E_{si}} \quad (6.2.11)$$

式中： $\Delta p_i$ ——第  $i$  层土的平均附加应力增量 (kPa)；

$l_i$ ——第  $i$  层土的厚度 (mm)；



$E_{si}$ ——基础底面下第  $i$  层土的压缩模量 (kPa) ;

$\psi_{s2}$ ——复合地基加固区下卧土层压缩变形量计算经验系数, 根据复合地基类型地区实测资料及经验确定。

6.2.12 作用在复合地基加固区下卧层顶部的附加压力宜根据复合地基类型采用不同方法。可根据桩土模量比大小分别采用等效实体法或压力扩散法计算。

6.2.13 夯实固化土桩固化剂掺入量宜取重量比的 6%~10%, 含水量与最优含水量的允许偏差为  $\pm 2\%$ 。土料性质差异大时, 宜进行配合比试验。

【条文说明】: 夯实固化土桩它是一种介于刚性桩和散体材料桩之间的一种可压缩桩, 固化剂掺入量宜取重量比的 6%~10%, 硬结而成的固化土桩身强度可达 2MPa~3MPa。

土料性质差异大是指级配不良的土料, 即不能同时满足  $CU \geq 5$ , 且  $CC = 1 \sim 3$  的土料。

## 6.3 施 工

6.3.1 施工前应根据设计要求, 进行工艺性试桩, 数量不得少于 3 根。

【条文说明】: 对重要工程、规模较大工程、岩土工程地质条件复杂的场地以及缺乏经验场地, 在正式施工前应选择有代表性场地进行工艺性试验施工, 并进行必要的测试, 检验设计参数、处理效果和施工工艺的合理性和适用性。

6.3.2 土料宜采用级配良好的工程用土或固废, 使用前应过孔径为 10mm~20mm 的筛。

6.3.3 固化土混合料配合比应符合设计要求, 含水量与最优含水量的允许偏差为  $\pm 2\%$ , 并应采取搅拌均匀的措施。

当用机械搅拌时, 搅拌时间不应少于 1min, 当用人工搅拌时, 拌和次数不应少于 3 遍。混合料拌和后应在 2h 内用于成桩。

6.3.4 成桩宜采用桩体夯实机, 宜选用梨形或锤底为盘形的夯锤, 锤体直径与桩

孔直径之比宜取 0.6~0.8，锤体质量应大于 120kg，夯锤每次提升高度，不应低于 600mm。

6.3.5 夯实固化土桩施工步骤应为成孔——分层夯实——封顶——夯实。成孔完成后，向孔内填料前孔底应夯实。填料频率与落锤频率应协调一致，并应均匀填料，严禁突击填料。每回填料厚度应根据夯锤质量经现场夯填试验确定，桩体的压实系数（ $\lambda_c$ ）不应小于 0.93。

6.3.6 桩位允许偏差，对满堂布桩为桩径的 0.4 倍，条基布桩为桩径的 0.25 倍；桩孔垂直度允许偏差为 1.5%；桩径的允许偏差为  $\pm 20\text{mm}$ ；桩孔深度不应小于设计深度。

6.3.7 施工时桩顶应高出桩顶设计标高 100mm~200mm，垫层施工前应将高于设计标高的桩头凿除，桩顶面应水平、完整。

6.3.8 成孔及成桩质量监测应设专人负责，并应做好成孔、成桩记录，发现问题应及时进行处理。

6.3.9 桩顶褥垫层材料不得含有植物残体、垃圾等杂物，铺设厚度应均匀，铺平后应振实或夯实，夯填度不应大于 0.90。

【条文说明】：垫层铺设宜分层进行，每层铺设应均匀，如铺设的散体材料含水量低，可适当加水，以保证密实质量。

## 6.4 质量检验

6.4.1 夯实固化土桩复合地基施工过程中应随时检查施工记录和计量记录，并应对照规定的施工工艺对每根桩进行质量评定。

6.4.2 桩体夯实质量的检查，应在成桩过程中随时随机抽取，检验数量应由设计单位根据工程情况提出具体要求。密实度的检测可在夯实水泥土桩桩体内取样测定干密度或以轻型圆锥动力触探击数（N）判断桩体夯实质量。

【条文说明】：根据夯实固化土桩复合地基成桩和桩体硬化特点，桩体夯实

质量的检查应在成桩后 2h 内进行, 随时随机抽取。抽检数量根据工程情况确定, 一般可取总桩数的 2%, 且不少于 6 根。检验方法可采用取土测定法检测桩体材料的干密度, 也可采用轻型圆锥动力触探试验检测桩体材料的 N10 击数, 相关试验要符合下列规定:

1 采用环刀取样测定其干密度, 质量标准可按设计压实系数 ( $\lambda_c$ ) 评定, 压实系数一般为 0.93;

2 采用轻型圆锥动力触探试验检测桩体夯实质量时, 宜先进行现场试验, 以确定具体要求, 试验方法应按现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB50021 有关规定, 成桩 2h 内轻型圆锥动力触探击数 (N10) 不应小于 40 击。

**6.4.3** 夯实固化土桩复合地基工程验收时, 复合地基承载力检验应采用单桩复合地基竖向抗压载荷试验。对重要或大型工程, 尚应进行多桩复合地基竖向抗压载荷试验。

**【条文说明】:** 本条强调工程竣工验收检验, 应该采用单桩复合地基或多桩复合地基竖向抗压载荷试验。

**6.4.4** 复合地基竖向抗压载荷试验应符合《复合地基技术规范》GB/T 50683 附录 A 的有关规定。

## 7 流态固化土桩复合地基

### 7.1 一般规定

7.1.1 流态固化土桩复合地基适用于黏性土、粉土、自重固结已完成的素填土、中等密实砂性土等的地基。

7.1.2 流态固化土桩复合地基应进行试桩。

7.1.3 流态固化土桩可通过适配设备成孔后,将流态固化土注入孔内固结形成桩体。

### 7.2 设计

7.2.1 流态固化土桩复合地基应根据上部结构荷载、基础形式和地基土工程特性指标等进行设计。

7.2.2 流态固化土桩应选择承载力和压缩模量相对高的土层作为桩端持力层。

7.2.3 流态固化土桩可根据工程经验,选择固废基胶凝材料、土或固废、水以及其他外加剂配合比,并可初步确定固化土材料的抗压强度设计值。缺乏经验时,应选用现场有代表性的土料进行配合比试验。

7.2.4 流态固化土桩的桩孔直径宜为 400mm~800mm,桩间距宜选择桩径的 3~5 倍。基础边缘与最外一排桩中心距不宜小于 1.0~1.2 倍的桩径。

7.2.5 桩顶和基础之间应设置褥垫层,褥垫层厚度宜为 200mm~300mm。褥垫层材料宜采用中砂、粗砂、级配砂石、碎石等,最大粒径不宜大于 20mm。

【条文说明】:当处理湿陷性场地时,褥垫层可采用灰土或低强度流态固化土。

7.2.6 流态固化土桩复合地基承载力特征值应通过复合地基静载荷试验或采用单桩静载荷试验结果和桩间土的承载力特征值结合经验确定,初步设计时,可按下列下式估算:

$$f_{spk} = \lambda_p m R_a / A_p + \beta(1-m) f_{sk} \quad (7.2.6-1)$$

$$m = d^2 / d_e^2 \quad (7.2.6-2)$$

式中： $\lambda$ ——单桩承载力发挥系数，可按地区经验取值；

$m$ ——面积置换率；

$d$ ——桩体直径（m）；

$d_e$ ——单根桩分担的地基处理面积的等效圆直径（m）；

$R_a$ ——单桩竖向承载力特征值（kN）；

$A_p$ ——桩的截面积（m<sup>2</sup>）；

$\beta$ ——桩间土承载力发挥系数，可按地区经验取值；

$f_{sk}$ ——桩间土承载力特征值（kPa）。

【条文说明】：式（7.2.6-1）中，单桩承载力发挥系数 $\lambda$ 可按地区经验取值，可取 1.0；桩间土承载力发挥系数 $\beta$ 可按地区经验取值 0.3~0.7，无经验时可根据桩径比取值，桩径大于 600mm 时，可取 0.3~0.5，小于 600mm 时，可取 0.5~0.7。

7.2.7 流态固化土单桩竖向承载力特征值可按式估算：

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha_p q_p A_p \quad (7.2.7)$$

式中： $u_p$ ——桩的周长（m）；

$q_{si}$ ——桩周第*i*层土的侧阻力特征值（kPa），可按现行国家标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94-2008有关规定确定，或按地区经验取值；

$l_i$ ——桩长范围内第*i*层土的厚度（m）；

$\alpha_p$ ——桩端端阻力发挥系数，可按地区经验确定；

$q_p$ ——桩端阻力特征值（kPa），应取桩端土未经修正的桩端地基承载力特征值。

【条文说明】：式（7.2.7）中，桩端端阻力发挥系数 $\alpha_p$ 可按地区经验确定（0.5~0.9）。无经验时，桩间土承载力特征值大于 150kPa 时，推荐取 0.5~

0.7；小于 150kPa 时，推荐取 0.7~0.9。

7.2.8 流态固化土桩复合地基增强体桩身强度应满足式（7.2.8-1）的要求。当复合地基承载力进行基础埋深的深度修正时，增强体桩身强度应满足式（7.2.8-2）的要求。

$$f_{cu} \geq 4 \frac{\lambda R_a}{A_p} \quad (7.2.8-1)$$

$$f_{cu} \geq 4 \frac{\lambda R_a}{A_p} \left[ 1 + \frac{\gamma_m (d - 0.5)}{f_{spa}} \right] \quad (7.2.8-2)$$

式中： $f_{cu}$ ——流态固化土试块（边长70.7mm立方体）标准养护28d的立方体抗压强度平均值（kPa）；

$\gamma_m$ ——基础底面以上土的加权平均重度（kN/m<sup>3</sup>），地下水位以下取有效重度；

$d$ ——基础埋置深度（m）；

$f_{spa}$ ——深度修正后的复合地基承载力特征值（kPa）。

【条文说明】：式（7.2.8-1）和式（7.2.8-2）中，关于  $f_{cu}$  取值的标准养护时间，相关研究表明：流态固化土的强度随龄期的增长而增大，在龄期超过 28d 后，强度仍有明显增长，90d 龄期强度约为 28d 龄期强度的 1.2~1.4 倍。当龄期超过 90d 后，流态固化土强度仍有缓慢增长，180d 龄期强度约为 90d 龄期强度的 1.2 倍。因目前相关案例较少，从安全角度考虑，初步设计阶段，本标准建议  $f_{cu}$  取 28d 龄期强度。随着工程应用实例的增加， $f_{cu}$  取值仍有优化空间。

7.2.9 流态固化土桩复合地基变形计算深度应大于复合土层的深度。复合土层的分层与天然地基相同，各复合土层的压缩模量等于该层天然地基压缩模量的  $\zeta$  倍， $\zeta$  值可按式确定：

$$\xi = \frac{f_{\text{spk}}}{f_{\text{ak}}} \quad (7.2.9)$$

式中： $f_{\text{ak}}$ ——基础底面下天然地基承载力特征值（kPa）。

7.2.10 流态固化土桩复合地基沉降变形的计算应按式计算：

$$S_1 = \psi_{s1} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i l_i}{E_{spi}} \quad (7.2.10)$$

式中： $S_1$ ——复合地基竖向压缩变形量；

$\psi_{s1}$ ——复合地基沉降变形计算经验系数，根据地区沉降观测资料统计值确定；

$\Delta p_i$ ——复合地基变形计算第*i*层土的地基附加应力增加值（kPa）；

$E_{spi}$ ——加固后第*i*层土复合地基压缩模量（kPa）；

$l_i$ ——穿过第*i*层土桩体长度（mm）。

【条文说明】：流态固化土桩复合地基的沉降变形计算经验系数 $\psi_{s1}$ 无地区经验时，可采用表 7.2.11。

7.2.11 规定的数值

表 7.2.11 复合地基的沉降变形计算经验系数

$\bar{E}_s$ (MPa)	4.0	7.0	15.0	20.0	35.0
$\psi_{s1}$	1.0	0.7	0.4	0.25	0.2

注： $\bar{E}_s$ 为变形计算深度范围内压缩模量的当量值，应按式计算：

$$\bar{E}_s = \frac{\sum_{i=1}^n A_i + \sum_{j=1}^m A_j}{\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{E_{spi}} + \sum_{j=1}^m \frac{A_j}{E_{sj}}} \quad (7.2.11)$$

式中： $A_i$ ——加固土层第*i*层土附加应力系数沿土层厚度的积分值；

$A_j$ ——加固土层下第*j*层土附加应力系数沿土层厚度的积分值。

## 7.3 施 工

7.3.1 施工前应根据设计要求，进行工艺性试桩，数量不得少于 3 根。

7.3.2 土料宜采用级配良好的工程用土或固废，使用前应过孔径为 10mm~20mm 的筛。

7.3.3 流态固化土桩施工机械设备应包括液压步履式长螺旋钻机、流态固化土专用搅拌设备、泵送压灌设备、基料预处理设备和辅助设备。

【条文说明】：根据流态固化土桩的桩长、桩径设计要求，选择配套的长螺旋桩机；依据泵送距离及泵送流量要求选择配套的泵送压灌设备。

7.3.4 流态固化土专用搅拌设备控制系统应具有配合比设定、生产过程计量系统显示、生产数据、校秤数据储存查询等功能。其计量精度应满足表 7.3.4 的规定。

表 7.3.4 专用搅拌设备动态计量精度

序号	原材料	允许偏差或允许值
1	基料	±2%
2	固化剂	±1%
3	水	±1%

7.3.5 流态固化土桩施工工艺流程参照本标准附录 B 的规定，具体要求如下：

1 为避免成孔过程对已完成压灌未凝固桩体的干扰，成桩施工顺序应采用隔桩隔排跳打的方式进行。成桩及复合地基示意图参照本标准附录 A 的规定；

2 流态固化土桩通过施工前的现场试搅拌、成桩试验，确保现场搅拌出的流态固化土相关指标达到如下要求：流动扩展度 150mm~200mm，悬浮性不大于 3%，沉缩比不小于 96%；

【条文说明】：以某项目直径 500mm 流态固化土桩为例，采用模块化流态固化土振动搅拌设备制浆，振动频率 25Hz，搅拌转速 36r/min，每盘制浆量 2m<sup>3</sup>，拌和时间 120s；长螺旋钻杆提升速度 2.0m/min~2.5m/min；泵送量 0.4m/min~0.48m/min。上述各参数匹配合理，取得了良好效果。



3 试制浆过程中必须对浆液的流动扩展度、悬浮性、沉缩比、湿密度进行现场试验，并进行现场泵送测试，留取相应浆液试块，验证和确定搅拌工艺、对室内试验确定的配合比进行再优化，确定施工配合比。每批基料进场都要检测其含水量，根据实际含水量，调整施工每盘浆液各物料的加入量。流态固化土的流动扩展度、悬浮性、沉缩比等测试方法应分别参照本标准附录 C、附录 D 和附录 E 的规定；

【条文说明】：试制浆开始前，要设定好每盘的制浆方量，一级罐振动搅拌好的流态固化土需暂存至二级搅（储）罐内，确保二级搅（储）罐储浆量宜略大于单桩实际压灌量。静置 30min 后的浆液各层密度变异系数  $C_v$  越小，浆液上下离析越小，悬浮性越好，固结体整体品质越均匀。

4 根据设计单位提供桩位平面布置图，对桩位进行编号。结合图纸设计要求，复核开孔场地标高（确保保护桩头不小于 500mm），放出桩位，桩位要留有记印，并经监理复检，复检合格后，作为施工时的依据；

5 桩机就位后，做好钻具的安装和泵送管道联接，对准桩位关闭单向阀门下钻至钻头进入土层，启动钻孔电机，同时调整塔架的垂直度，偏差不得超过 1% 桩长，桩心偏差不得大于  $1/20D$ ；

6 当钻机钻至设计深度时，开始泵送流态固化土，待其到达钻具底部时，开始提钻，提升钻头速度与泵送流态固化土速度应互相匹配，每根桩压灌过程中要确保连续压灌，提至桩顶标高后停止泵料，单根桩施工完成，移机至下一个桩位；

7 每压灌  $50\text{m}^3$  流态固化土，需留取试样 1 组，同时应对其流动扩展度、密度进行检测。当一个班组流态固化土压灌量不足  $50\text{m}^3$  时，应至少留取 1 组试块，试块尺寸为  $70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm}$ ，每个试块上标记试块的制作时间、所属桩号。试块留取后进行标准养护，养护到期后（按不同龄期）进行

抗压强度试验,试验方法应符合现行行业标准《建筑砂浆基本性能试验方法标准》JGJ/T 70-2023 的规定;

【条文说明】: 每组试块均应进行 28d 龄期的强度试验。另建议增加留取 20%~30%的试块进行 7d 龄期的强度试验,以验证各施工阶段的原材料性能、配合比、施工质量等,确保施工整体质量。

8 成桩一定数量后采用挖掘机等将钻孔钻出的土料清运至筛土场,以备再利用。

7.3.6 流态固化土在配置配合比试验和现场施工期间,其养护、拌合和施工要注意控制好温度。

【条文说明】: 拌合温度: 冬期拌合应采取保温措施,优先采用加热水的方法提高拌合物温度,拌合用水温度应低于 60℃。

养护温度: 标准养护试件应在 20℃±2℃条件下养护至指定龄期。

施工环境温度: 不宜在气温低于 5℃时浇注,否则应采取保温措施。此外,环境温度低于 5℃时,固化反应速率显著降低,需添加早强剂或延长养护周期。高温环境下则要注意保湿养护。

7.3.7 桩位允许偏差,对满堂布桩为桩径的 0.4 倍,条基布桩为桩径的 0.25 倍;桩孔垂直度允许偏差为 1.5%;桩径的允许偏差为±20mm;桩孔深度不应小于设计深度。

7.3.8 施工时流态固化土桩顶应高出桩顶设计标高不小于 500mm,垫层施工前应将高于设计标高的桩头凿除,桩顶面应水平、完整。

【条文说明】: 流态固化土桩成桩过程中,当流态固化土压灌至桩顶时,受其泵送工艺影响,桩顶质量不易保证,因此须在其设计桩顶标高预留 50cm 以上保护桩头。

7.3.9 桩顶垫层材料不得含有植物残体、垃圾等杂物,铺设厚度应均匀,铺平后

应振实或夯实，夯填度不应大于 0.90。

7.4 质量检验

7.4.1 流态固化土桩质量检验按时间顺序可分为三个阶段：施工前检验、施工过程中检验和施工后检验。

7.4.2 流态固化土桩施工前应对流态固化土的配合比、基料、固化剂与拌和用水进行检测，确保满足设计桩身质量。

【条文说明】：进场基料应按每 800t 检测一次；进场固化剂应按每 200t 检测一次。

7.4.3 流态固化土桩施工前，应根据设计要求进行试桩，并进行静载荷试验，提供单桩承载力和复合地基承载力，作为设计和施工依据，试桩数量不宜少于 3 根（组）。若地质条件复杂，成桩可靠性差，宜适当增加试桩数量。

7.4.4 流态固化土桩在施工过程质量检验中应检查控制性轴线、桩位、配合比、钻机的垂直度、钻杆外直径、钻杆提升速度、泵送速度、桩顶及桩底标高等施工参数。

7.4.5 施工过程中留取的流态固化土试块应按时进行分类、登记，及时进行抗压强度试验并建立台账。

7.4.6 流态固化土桩质量检验应满足表 7.4.6 的规定。

表 7.4.6 流态固化土桩质量检验

项	序	检查项目	允许偏差或允许值		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	材料用量	%	±2	称重计量
	2	桩径	mm	±20	钢尺或填料量
	3	桩长	mm	±50	测桩孔深度
	4	桩身强度	设计要求		试块抗压强度试验

	5	单桩承载力	设计要求		现场静载荷试验
	6	复合地基承载力	设计要求		现场静载荷试验
一般项目	1	土料有机质含量	%	$\leq 5$	焙烧法
	2	基料含水量	%	$\leq 20$	烘干法
	3	浆液流动扩展度	mm	180 ~ 220	现场扩展度仪
	4	浆液容重	设计要求		现场容重仪
	5	浆液沉缩比	%	$\geq 96$	量筒检测
	6	浆液悬浮性	%	$\leq 3$	量筒检测
	7	桩位偏差	满堂布桩 $\leq 0.40D$ 条基布桩 $\leq 0.25D$		钢尺测量 全站仪测量
	8	垂直度	%	$\leq 1$	钻机自带垂直调平仪

**7.4.7** 流态固化土桩承载力检验宜在施工结束 28d 后进行，其桩身强度应满足试验荷载条件，复合地基静载荷试验和单桩静载荷试验的数量不应少于工程桩总数的 1%，且每个单体工程的复合地基静载荷试验的试验数量不应少于 3 根（组）。

**7.4.8** 流态固化土桩单桩载荷试验、复合地基载荷试验方法应符合现行行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-2012 的规定。

**7.4.9** 对于地质环境条件复杂、对变形有严格要求的建筑物或对施工质量有疑问的工程，须进行桩身钻孔通长取芯，对其进行桩身芯样强度及完整性检测。

**【条文说明】**：流态固化土桩因桩体材料为流态固化土，采用传统小应变测试桩身完整性无明显效果，大规模采用钻孔全孔取芯检测其完整性时，受工期及费用限制，影响工程进度及造价。从流态固化土桩施工工艺来看，其成桩质量及桩身完整性均易得到保障，故针对一般项目，加强施工过程中的质量控制便可基本保证桩体质量及桩身完整性；对于地质环境条件复杂或对施工质量有疑问的工

程，须进行桩身钻孔通长取芯，对其进行桩身芯样强度及完整性检测（取芯钻具应采用单动双管）。

## 8 固化土支护桩

### 8.1 一般规定

8.1.1 固化土支护桩主要包括固化土咬合桩及型钢固化土桩。适用于砂土、粉土、黏性土和碎石土等地层。在腐蚀环境及无工程经验时,应通过试验确定其适用性。

8.1.2 应综合考虑工程地质与水文地质、周边建构筑物等条件,合理确定施工工艺、参数,并应满足周边环境保护的要求。

8.1.3 施工前应收集场地的管线资料及地下建构筑物基础资料,查明影响支护施工的相关障碍物,并予以妥善处理。

8.1.4 根据基坑深度及地下水位及承载力要求等确定流态土桩的强度要求,并应在施工前进行试配,确保强度,渗透系数等各项指标满足设计要求。

### 8.2 设计

8.2.1 支护结构的计算应按现行标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ120、《型钢水泥土搅拌墙技术规程》JGJ/T 199 及《咬合式排桩技术标准》JGJ/T 396 的有关规定进行。

8.2.2 固化土支护结构的设计应包括下列内容:

- 1 支护结构内力和变形计算;
- 2 基坑整体稳定性验算;
- 3 抗倾覆稳定性验算;
- 4 坑底抗隆起稳定性验算;
- 5 抗渗流稳定性验算。

8.2.3 型钢流态土桩支护体系用于基坑支护计算时,只计入型钢的刚度,为保证支护结构的整体性,需在桩顶设置封闭式冠梁。

8.2.4 固化土咬合桩支护体系一般为一荤一素的形式,其中荤桩为钢筋混凝土桩,素桩为流态固化土桩。素桩用于桩间止水,咬合量根据桩长及施工垂直度要

求确定，材料强度需满足接缝处抗剪要求。

8.2.5 支护结构计算时宜只计入钢筋混凝土桩的刚度及承载力作用，依据《建筑基坑支护技术规程》JGJ120 规定进行计算。同时应对咬合处桩身局部受剪承载力进行验算。

【条文说明】常见型钢的尺寸有 H500x300、H700x300、H800x300，与其尺寸相匹配的桩孔直径宜分别为 650mm、850mm 及 1000mm。

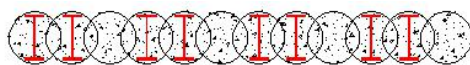
型钢流态土桩冠梁平面尺寸一般宜比桩孔大 350mm，以便于后期型钢的拔除。如单根型钢长度不满足设计要求时，可采用焊接的形式进行接长，焊缝质量等级不低于二级，焊接接头的位置应避免设在支撑位置或开挖面附近等型钢受力较大处。

8.2.6 桩基成孔灌入流态土后，插入型钢，流态土 28d 无侧限抗压强度不应小于设计要求且不小于 0.5MPa。当有止水要求时，应采用咬合式的布桩形式，此时应通过计算确定流态土强度要求。常见的咬合式固化土桩型钢布置形式主要有三种：密插、隔一插二、隔一插一。

【条文说明】常用的型钢布置形式如下。



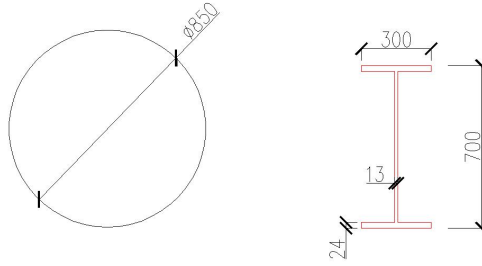
a、密插型



b、隔一插二型



c、隔一插一型



d、桩径及内插型钢尺寸（典型尺寸）

图 8.2.6-1 型钢布置图

### 8.2.7 型钢的截面承载力应按下列规定验算：

作用于型钢流态土支护体系的弯矩全部由型钢承担，并应符合下式规定：

$$\frac{1.25\gamma_0 M_k}{W} \leq f \quad (8.2.7-1)$$

式中：

1.25-作用基本组合的分项系数；

$\gamma_0$ -支护结构重要性系数，根据基坑安全等级选用：一级基坑取 1.1，二级基坑取 1.0，三级基坑取 0.9；

$M_k$ -作用于型钢流态土支护结构的弯矩标准值(N.mm)；

$W$ -型钢沿弯矩作用方向的截面模量（mm<sup>3</sup>）；

$f$ -型钢的抗弯强度设计值(N/mm<sup>2</sup>)，根据现行《钢结构设计标准》GB50017 确定。

作用于型钢流态土支护上的剪力全部由型钢承担，并应符合下式要求。

$$\frac{1.25\gamma_0 V_k S}{I_{tw}} \leq f_v \quad (8.2.7-2)$$

其中：

$V_k$ -作用于单根型钢的剪力标准值(N)；

$S$ -型钢计算处以上毛截面对中和轴的面积矩(mm<sup>3</sup>)；

$I$ -型钢沿弯矩作用方向的毛截面惯性矩（mm<sup>4</sup>）；



$t_w$ -型钢腹板厚度 (mm) ;

$f_v$ -型钢的抗剪强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>) , 根据现行《钢结构设计标准》GB50017 确定。

【条文说明】根据 H 型钢截面特点, 中性轴处为最危险截面, 此时,  $f_v$  应取腹板处截面的抗剪强度设计值 (由腹板钢材牌号及腹板厚度确定)。

8.2.8 当有止水要求时, 应采用咬合式的支护体系, 此时应验算型钢与流态土交界面及流态土咬合处的抗剪强度, 如下图所示。

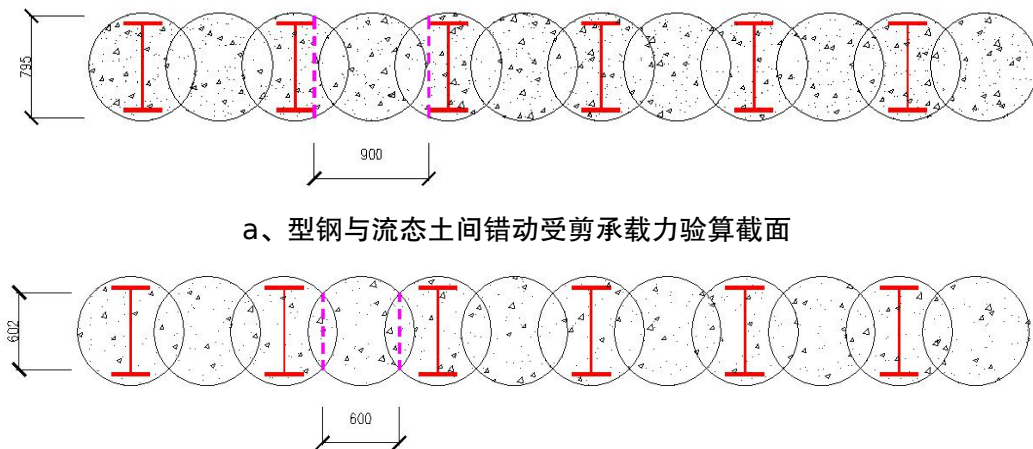


图 8.2.8-1 流态土局部抗剪验算截面

图 8.2.8-1a 中的截面的错动受剪承载力应按式下进行计算

$$N_T \leq N \quad (8.2.8-1)$$

$$N_T = \frac{1.25 \gamma_0 V_{1k}}{d_{e1}} \quad (8.2.8-2)$$

$$V_{1k} = q_k L_1 / 2 \quad (8.2.8-3)$$

$$\tau = \frac{\tau_{ck}}{1.6} \quad (8.2.8-4)$$

式中:

$\tau$ -作用于型钢与流态土之间的错动剪应力设计值 (N/mm<sup>2</sup>) ;

$V_{1k}$ -作用于型钢与流态土之间单位深度范围内的错动剪力标准值 (N/mm) ;  
 $q_k$ -作用于型钢流态土搅拌墙计算截面处的侧压力强度  $q_k$  标准值 (N/mm<sup>2</sup>) ;

$L_1$ -相邻型钢翼缘之间的净距 (mm) ;

$D_e$ -型钢翼缘处流态土墙体的有效厚度 (mm) ;

$\tau$ -流态土抗剪强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>) ;

$\tau_{ck}$ -流态土抗剪强度标准值 (N/mm<sup>2</sup>) , 可取流态土 28d 龄期无侧限抗压强度的 1/3。

图 8.2.8-1b 中的咬合交接处进行抗剪验算, 应满足下式要求:

$$\sigma_2 \leq \sigma \quad (8.2.8-5)$$

$$\sigma_2 = \frac{1.25\gamma_0 V_{2k}}{d_{e2}} \quad (8.2.8-6)$$

$$V_{2k} = q_k L_2 / 2 \quad (8.2.8-7)$$

$V_{2k}$ -作用于流态土最薄弱截面处单位深度范围内的剪力标准值 (N/mm) ;

$L_2$ -流态土相邻最薄弱截面的净距 (mm) ;

$d_{e2}$ --流态土最薄弱截面处墙体的有效厚度 (mm) 。

流态土咬合桩只需对咬合处进行局部抗剪验算, 如下图, 相关计算公式与型钢流态土桩的相同。

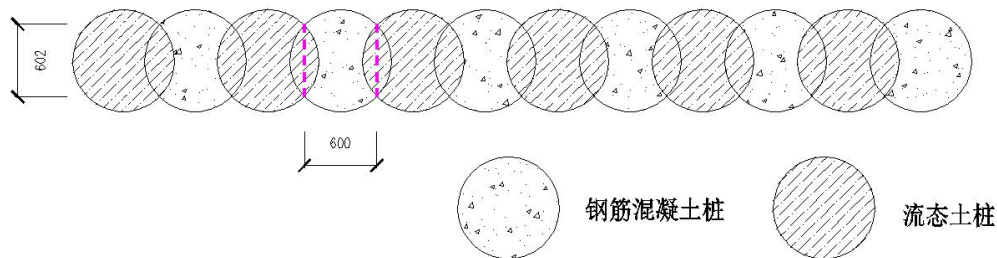


图 8.2.8-2 流态土咬合桩局部抗剪验算截面 (以 850@600 为例)

【条文说明】基坑整体稳定性, 抗倾覆稳定性, 坑底抗隆起稳定性, 抗渗流

稳定性等验算内容均按现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ120 执行。

## 8.3 施工

8.3.1 流态固化土桩的施工应满足下述要求，保证施工质量。

8.3.1.1 基坑工程实施前，应调查项目的施工条件、地质状况及周围环境条件，地下障碍物的状况等。对影响桩基成桩的不利因素，应提前处理，确保工程顺利实施。

【条文说明】桩基施工前，应复核测量基准线、基准点，做好测量、放线工作。基准点应设在不受桩基施工影响的区域，并应妥善保护。

8.3.1.2 在桩顶上部沿桩位两侧施作钢筋混凝土导墙，导墙净距应比设计桩径大 40~60mm，采用现浇钢筋混凝土结构，混凝土强度不应低于 C20。导墙厚度宜为 300mm~500mm，导墙宽度应大于 1m，导墙钢筋宜采用单层双向布置，钢筋级别不应低于 HRB400，直径不应小于 12mm，纵横间距宜采用 200mm。

8.3.1.3 施工前应进行试桩，试桩应符合下列规定：

- 1 试桩位置的工程地质条件应具有代表性；
- 2 试桩数量不应少于 1 组，每组不应少于 3 根，其中先期施工的被咬合的桩不应少于 2 根，后续施工咬合桩不应少于 1 根；
- 3 试桩应能确定施工设备、工艺参数、成孔时间、流态固化土的凝结时间等。

8.3.1.4 单桩流态固化土灌注应连续，充盈系数不得小于 1.0。

孔内无水时应采用干孔灌注施工，采用串筒或导管，孔内有水时应采用导管法水下灌注施工，水下灌注时应符合下列规定：

- 1 导管应提离孔底 0.5m，初灌量应确保能埋住导管 0.8m~1.3m；
- 2 导管埋入深度宜为 4m~6m，最小埋入深度不得小于 2m，浇灌固化土时应连续，随浇随提，严禁将导管提出固化土面或埋入过深，一次提拔导管不得

超过 6m；

3 导管提升应缓慢、平稳，避免出料冲击过大。

8.3.1.5 型钢宜在桩孔灌入固化土后插入，插入前应检查其平整度和接头焊缝质量。

型钢宜依靠自重插入，当型钢插入有困难时可采用辅助措施下沉。严禁采用多次重复起吊型钢并松钩下落的插入方法，型钢插入垂直度不应大于 1/200。

型钢插入前应先在干燥条件下除锈，再在其表面涂刷减摩材料。在搬运过程中应防止碰撞和强力擦挤。减摩材料如有脱落、开裂等现象应及时修补。

【条文说明】型钢的插入必须采用牢固的定位导向架，在插入过程中应采取 措施保证型钢垂直度，型钢插入到位后应控制型钢顶标高。型钢拔除前流态土支 护桩与主体结构地下室外墙之间的空隙必须回填密实。在拆除支撑和腰梁时应将 残留在型钢表面的腰梁限位或支撑抗剪构等清除干净，型钢起拔宜采用专用设 备。

8.3.2 固化土咬合桩的导墙、桩基成孔及灌注要求要求同型钢流态土桩支护体系 要求，因固化土早强的特性，在其灌注 2~3 天后，即可进行相邻桩的成孔。 其他施工要求按现行行业标准《咬合式排桩技术标准》JGJ/T 396 有关规定执行。

8.4 质量检验

8.4.1 根据《建筑地基检测技术规范》JGJ 340、《型钢水泥土搅拌墙技术规程》 JGJ/T 199 相关要求，质量检验主要包括型钢质量的检测及流态土强度等内容。

8.4.2 焊接型钢焊缝质量应符合设计要求和现行行业标准《焊接 H 型钢》YB 3301 和《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ81 的有关规定。H 型钢的允许偏差应 符合表 8.4.2 的规定。

表 8.4.2 H 型钢允许偏差及检测要求

序号	检查项目	允许偏差 (mm)	检测数量	检测方法
----	------	--------------	------	------

1	截面高度	$\pm 5$	每根	用钢尺量
2	截面宽度	$\pm 3$	每根	用钢尺量
3	腹板厚度	-1.0	每根	用游标卡尺量
4	翼缘板厚度	-1.0	每根	用游标卡尺量
5	型钢长度	$\pm 50$	每根	用钢尺量
6	型钢挠度	L/500	每根	用钢尺量

表中 L 为型钢长度。

**8.4.2.1** 钻取桩芯强度试验应钻取施工后 **28d** 龄期的流态土芯样，钻取的芯样应立即密封并及时进行无侧限抗压强度试验。抽检数量不应少于总桩数的 **2%**，且不得少于 **3** 根。每根桩的取芯数量不宜少于 **5** 组，每组不宜少于 **3** 件试块。取芯开孔位置宜在距桩中心 **0.15D~0.25D** 的范围内均匀对称布置。

**8.4.2.2** 钻取芯样宜采用液压操纵的高速工程地质钻机，并配备相应的水泵、孔口管、扩孔器、卡簧、扶正稳定器及可捞取松软渣样的钻具。宜采用双管单动或更有利于提高芯样采取率的钻具。钻杆应顺直，钻杆直径宜为 **50mm**。

**8.4.2.3** 钻取芯样钻机应根据身设计强度选用合适的薄壁合金钢钻头或金刚石钻头，钻头外径不宜小于 **91mm**。锯切芯样试件用的锯切机应具有冷却系统和夹紧牢固的装置；芯样试件端面的补平器和磨平机应满足芯样制作的要求。

**8.4.2.4** 试验抗压试件直径不宜小于 **70mm**，试件的高径比宜为 **1:1**；抗压芯样应进行密封，避免晾晒，芯样加工时应将芯样固定，锯切平面垂直于芯样轴线。当锯切后的芯样试件不满足平整度及垂直度要求时(沿试件高度任一直径与平均直径相差达 **2mm** 以上时；试件端面的不平整度在 **100mm** 长度内超过 **0.1mm** 时；试件端面与轴线的不垂直度超过 **2°**时)，应进行端面加工。

**8.4.2.5** 芯样试件制作完毕可立即进行抗压强度试验：

试验机宜采用高精度小型压力机，试验机额定最大压力不宜大于预估压力的 **5** 倍，芯样试件抗压强度应按下式计算确定：

$$f_{cu} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (8.4.2.5-1)$$

$f_{cu}$ —芯样试件抗压强度（MPa），精确至 0.01MPa；

$P$ —芯样试件抗压试验测得的破坏荷载（N）；

$d$ —芯样试件的平均直径（mm）。

桩身芯样试件同一段抗压强度代表值应按一组三块试件强度值的平均值确定。

流态土芯样试件抗压强度代表值应取各段流态土芯样试件抗压强度代表值中的最小值。

对单位工程同一条件下的受检桩，应取桩身芯样试件抗压强度代表值进行统计，并按下列公式分别计算平均强度、标准差和变异系数。

$$\bar{q}_{uf} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{ufi}}{n} \quad (8.4.2.5-2)$$

$$\sigma_{uf} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{q}_{uf} - q_{ufi})^2} \quad (8.4.2.5-3)$$

$$\delta_{uf} = \frac{\sigma_{uf}}{\bar{q}_{uf}} \times 100\% \quad (8.4.2.5-4)$$

式中： $q_{ufi}$ —单桩的芯样试件抗压强度代表值（kPa）；

$\bar{q}_{uf}$ —检验批水泥土桩的芯样试件抗压强度平均值（kPa）；

$\sigma_{uf}$ —桩身抗压强度代表值的标准差（kPa）；

$\delta_{uf}$ —桩身抗压强度代表值的变异系数；

$n$ —受检桩数；

并应按下列公式计算桩身强度标准值：

$$\gamma_s = 1 - \left\{ \frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right\} \delta \quad (8.4.2.5-5)$$

$$\phi_k = \gamma_s \phi_m \quad (8.4.2.5-6)$$

$\phi_k$  -原位试验数据的标准值；

$\gamma_s$  -统计修正系数。

**8.4.2.6** 固化土咬合桩中关于钢筋混凝土桩的检验，按现行行业标准《咬合式排桩技术标准》JGJ/T 396 的有关规定执行，关于固化土的检测要求同型钢固化土支护桩的检测要求。

**【条文说明】**芯样应在全桩长范围内连续钻取的桩芯上选取，取样点应取沿桩长不同深度和不同土层处的 5 点，且在基坑坑底附近应设取样点。钻取桩芯得到的试块强度，由于钻取桩芯过程和试验中会对流态土产生一定程度上损伤；钻孔取芯完成后，芯样暴露在空气中会导致水分的流失，取芯后制作试块的过程中会产生较大扰动等原因导致流态土试块的强度偏低，因此试验得到的搅拌桩强度，应乘以 1.2~1.3 的系数，钻孔取芯完成后的空隙应注浆填充。

**8.4.2.7** 常规的试件端面加工方法：

1 在磨平机上磨平；

2 用水泥砂浆、水泥净浆等材料补平；水泥砂浆或水泥净浆的补平厚度不宜大于 5mm，补平层应与芯样结合牢固，受压时补平层与芯样的结合面不得提前破坏；

3 芯样试件高度不得小于 0.95d 或大于 1.05d 时（d 为芯样试件平均直径）；

**8.4.3** 基坑开挖前应检验固化土支护桩的桩身强度，强度指标应符合设计要求。桩身强度宜采用钻芯强度试验确定。

## 9 固化土回填

### 9.1 一般规定

9.1.1 固化土回填应采用符合本规程第4章要求的材料，按压实固化土或流态固化土的形式，对基坑、基槽、管沟、路基缺口、地下结构周边及场地平整形成的低洼区域进行回填施工。由固化土形成的回填体应构建具有规定强度和稳定性的结构体系，确保实现恢复场地标高、保障地下结构稳定、传递上部荷载及满足后续施工条件的要求。

9.1.2 固化土回填应采用符合环保、低碳、经济、高效原则的材料，确保材料性能满足工程设计对强度、耐久性和稳定性的要求。材料的选用、检验、储存及运输应严格按照本规程第4章的相关规定执行。

9.1.3 固化土回填形式的选择，应综合考量应用场景的设计技术要求、现场施工条件（作业空间、地质水文条件等）、工期管控要求等因素，经技术经济比选后合理确定。压实固化土适用于对回填体强度、密实度及稳定性有明确设计指标要求，且现场具备机械或人工压实作业条件（作业空间、压实设备适配性）的工程场景；流态固化土适用于回填区域空间狭窄（如地下结构周边狭小间隙）、几何形状不规则，或因场地限制无法实施机械压实作业，且对回填体密实度（要求无空洞、无分层）、整体性及稳定性有设计要求的工程场景。

9.1.4 固化土回填施工工法的选择应结合设计要求与施工条件进行选择。固化土回填施工工法可分为压实固化土回填工法（现场拌和工法、集中厂拌工法）、流态固化土回填工法。



## 9.2 设 计

9.2.1 固化土回填设计应贯彻“科学合理、节能环保、就地取材、经济优质”的设计理念，注重现场调查。根据建筑物的类型、规模、荷载情况以及场地的地质条件等，确定回填的范围、厚度和强度要求，选择技术可靠，经济合理，施工方便的固化土回填结构设计方案。

9.2.2 固化土配合比设计应依据本规程 4.3 节的规定进行，以满足设计强度、水稳性和压实度等要求为目标。在设计过程中，应充分考虑回填空间的特点，合理选择胶凝材料、集料和基土的种类及比例。对于压实固化土需关注其压实性能和强度增长特性；流态固化土，则要重点控制其流动性和凝结时间。

9.2.3 固化土回填设计应考虑其与周边土体或结构的相互作用，确保回填体与周边介质紧密结合，避免出现脱空、渗漏等现象。在狭窄空间回填时，要采取措施增强回填体与周边结构的粘结力；场地回填则需处理好与原地基土的衔接，保证整体稳定性。

9.2.4 对于有防水、抗渗要求的回填区域，应在设计中采取相应的措施，如调整配合比提高固化土的抗渗性能，设置防水层或止水带等，确保回填工程满足防水要求。

## 9.3 施 工

9.3.1 固化土回填施工的一般规定应符合下列要求：

1 固化土回填施工前，应确保施工场地具备稳定基础条件，对软弱地基、不均匀地基等应按设计要求进行预处理，避免影响固化土回填的施工质量。在狭窄空间施工时，应对周边结构进行保护，防止施工过程中造成损坏；

2 固化土回填施工所用原材料，包括胶凝材料、集料、基土和水等，应严格符合本规程第4章的质量要求。材料进场时，必须提供质量检验报告，

并按规定进行抽样复检，合格后方可使用；

3 固化土回填施工应依据工程规模、施工工艺及场地条件合理选择施工设备，确保设备性能良好、功能齐全，满足施工需求。施工前需调试、维护设备，保证施工中设备正常运行；

4 固化土回填施工宜在环境温度不低于5℃的条件下进行，避免低温影响固化土凝结与硬化。环境温度低于5℃时，需采取原材料加热、覆盖保温材料等保温措施；

5 固化土回填施工前需进行详细技术交底，使施工人员熟悉施工工艺、技术要求、质量标准及安全注意事项；同时制定合理施工计划，明确各环节时间安排与人员分工，确保施工有序开展。

### 9.3.2 固化土回填的施工准备应符合下列规定：

1 全面清理施工场地进行，清除场地内的杂草、杂物、垃圾以及障碍物等，确保场地平整。清理回填空间内的杂物和积水，保证施工空间整洁。同时，应做好排水设施，防止施工过程中场地积水，影响施工质量；

2 按设计配合比备料，确保原材料质量与数量满足施工需求，且不同种类的原材料应分别存放，避免混杂。胶凝材料应存储在干燥、通风的仓库内，防止受潮结块；基土应堆放整齐，并采取防雨、防尘措施；

3 在施工现场设置试验室或委托有资质的试验室，对施工过程中的原材料、混合料进行质量检测。试验设备需齐全且经校准检定，确保检测数据的准确性。

### 9.3.3 压实固化土回填施工应符合下列规定：

1 压实固化土现场拌和工法施工工艺流程：施工准备→测量放线→摊铺基土→摊铺胶凝材料→初拌→复拌→整平→碾压→养护；

2 压实固化土集中厂拌工法施工工艺流程：施工准备→测量放线→混合料拌和→混合料运输→摊铺混合料→整平→碾压→养护；

3 碾压：根据固化土的性质、现场情况和压实设备的性能，选择合适的碾压工艺。一般先采用轻型压路机稳压 1~2 遍，再用重型压路机进行压实。碾压应遵循先轻后重、先慢后快、由边缘向中间的原则，相邻碾压带应重叠  $1/3 \sim 1/2$  轮宽。碾压速度控制在  $1.5 \sim 2.5\text{km/h}$ ，碾压遍数通过现场试验确定，以达到设计压实度要求为准。在碾压过程中，应密切关注混合料的压实情况，如发现“弹簧”、“起皮”、“拥包”等现象，应及时采取处理措施。对于“弹簧”现象，可翻松晾晒或添加适量的干料后重新碾压；对于“起皮”现象，可适当洒水后重新碾压；对于“拥包”现象，应及时铲除并重新摊铺碾压；

4 养护：压实固化土回填碾压完成后，应及时进行养护。养护方式可采用覆盖塑料薄膜或土工布养护等，养护时间宜不少于 7d。养护期间，应保持回填表面湿润，避免暴晒和雨淋。同时，应封闭交通，禁止车辆通行，确保回填体在养护期间不受扰动，保证其强度的正常增长。

#### 5 施工注意事项：

（1）施工过程中严格控制各施工环节质量，确保每道工序符合设计和规范要求。加强对原材料质量、混合料配合比、拌和均匀性、摊铺厚度、压实度和养护条件等方面的检查和控制，发现问题及时整改；

（2）注意施工安全，施工现场应设置明显的安全警示标志，施工人员应佩戴安全帽、安全鞋等个人防护用品。机械设备的操作应严格按照操作规程进行，定期对设备进行检查和维护，确保设备安全运行；

（3）雨期施工应做好防雨措施，遇降雨及时停止施工，并对已摊铺的混合料进行覆盖，防止雨水冲刷。雨后处理受雨水浸泡的部分（如翻晒、换填），合格后方可继续施工；

（4）压实固化土回填施工完成后，养生期间应避免在其上进行剧烈的震动或扰动（如大型机械的频繁行驶、强夯作业等），防止破坏结构层的强

度。

9.3.4 流态固化土回填施工应符合下列规定：

1 流态固化土施工应结合现场施工场地、施工工期选择合适制备设备，流态固化土制备设备包括土的筛分设备、胶凝材料浆液拌制设备及流态固化土拌合设备，且需符合下列规定：

- （1）搅拌、浇筑设备的生产能力和设备性能应满足连续作业要求；
- （2）搅拌设备应具备胶凝材料、水及土等材料的计量和拌合的功能；
- （3）拌合设备的质量计量偏差应符合表 9.3.4.1 的规定。

表 9.3.4.1 原材料质量计量偏差控制表

原材料	质量计量偏差控制
胶凝材料	$\pm 2\%$
基土（集料）	$\pm 3\%$
外加剂	$\pm 1\%$

2 选用与试验原材料类别、成分相同的材料作为施工材料，当施工原材料与试验原材料不同时，应重新进行配合比试验。

3 当施工原材料和试验原材料含水量不同时，需根据施工原材料含水量确定实际施工配合比。

4 流态固化土制备可分为两步：先将胶凝材料与一定量的水拌合成浆液，再将胶凝材料浆液与基土（集料）进行拌合。流态固化土的制备工艺流程如图 9.3.4.4 所示。

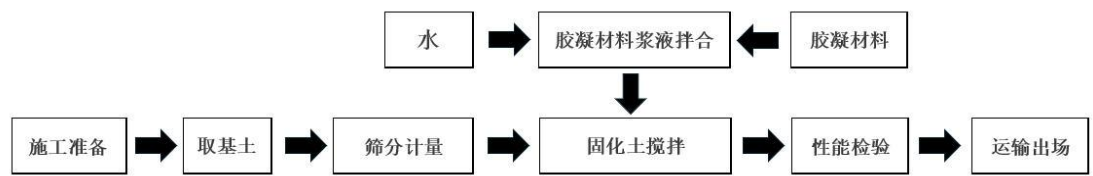


图 9.3.4.4 流态固化土制备工艺流程

5 混合料应使用专门机械搅拌并搅拌均匀，搅拌时间不少于 2min。

6 流态固化土可采用现场搅拌直接浇筑，也可在搅拌站集中搅拌，通过混凝土罐车运输到现场进行浇筑。

7 流态固化土浇筑与养护应符合下列规定：

（1）浇筑前应根据施工现场条件确定浇筑方式，浇筑可采用泵送或溜槽方式进行；

（2）流态固化土搅拌至浇筑完成的时间不宜超过 6h；

（3）宜采用分层进行浇筑，填筑厚度应根据对侧壁或模版的侧压力确定。首次浇筑厚度不宜超过 2m，相邻片区浇筑高差不宜大于 1m；

（4）浇筑基槽底标高不一致时，应按先深后浅的顺序施工；

（5）结合工程所在地气候环境，确定冬、雨期施工起止时间，及时掌握气象变化并做好防范。浇筑时遇大雨或持续小雨，需覆盖未硬化填筑体表层，且不再新开作业段；冬期施工时，固化土入模温度不应低于 5℃，并在肥槽顶部覆盖保温；

（6）采用的流态固化土塌落度小于 150mm，浇筑后要进行振捣；

（7）每一层浇筑完成后，应定期进行洒水养护或覆盖保湿，采用塑料薄膜覆盖养护时，固化土表面应覆盖严实，并保持膜内有凝结水；无法进行覆盖薄膜养护时，应在表层流态固化土凝固后及时喷淋或喷雾养护，喷淋应采用细微水流，不得在流态固化土表面形成积水；

（8）填筑体顶层浇筑完后，应对填筑体表面覆盖塑料薄膜或土工布进行保湿养护，养护时间不少于 7d。应保持回填表面湿润，避免暴晒和雨淋。同时，应避免在养护期间对回填体进行扰动，确保其强度正常增长。

## 9.4 质量检测

9.4.1 碾压式固化土回填质量检验应符合下列规定：

1 施工过程中按规定频率抽样检验原材料（胶凝材料、集料、基土、水等），检验项目及标准符合本规程第 4 章要求，确保原材料质量合格；

2 现场检测固化土回填压实度，检测频率应符合相关规范要求。对于狭窄空间回填，每 50m<sup>3</sup>至少检测 1 点；场地回填时，1000m<sup>2</sup>以下工程，每 100m<sup>2</sup>至少应有 1 点；1000m<sup>2</sup>以上工程，每 200m<sup>2</sup>至少应有 1 点。每一独立基础下至少应有 1 点，基槽每 20 延米应有 1 点。压实度检测可采用环刀法、灌砂法或核子密度仪法等，检测结果应满足设计压实度要求；

3 固化土回填养生期结束后进行承载力检测。检测方法、检验频率和要求因工程类型、规模、地质条件及相关规范而异，可参照相关标准执行。承载力测试结果应符合设计强度要求；

4 对固化土回填的外观质量应进行检查：回填体表面应平整，无明显裂缝、松散等现象；狭窄空间回填检查填充饱满度；场地回填检查边界整齐。外观质量不达标时应及时进行处理；

5 固化土回填质量不符合要求时，根据具体情况采取返工、补强等处理措施，处理后应重新进行检验，直至符合设计和规范要求。

9.4.2 流态固化土回填质量检验应符合下列规定：

1 流态固化土填筑工程验收的检验批可根据施工需求、质量控制和专业验收需要，按工程量、施工段、变形缝等进行划分；

2 流态固化土的检验项目应包括表 9.4.2.2 的项目；

表 9.4.2.2 流态固化土的检验项目

检验内容	分类	检查项目
材料	主控项目	胶凝材料
	一般项目	水
		基土（集料）
开盘鉴定	主控项目	资料检验和留置试块

	一般项目	拌合物湿密度、凝结时间、流动扩展度
施工	主控项目	抗压强度
	一般项目	拌合物湿密度、流动扩展度
		施工现场条件检验
		养护检验
		标高检验

3 胶凝材料进场必须按批次对其品种、包装、出厂日期等进行验收，并测试胶凝材料的凝结时间和按照流态固化土确定的配合比测试强度，其质量应符合的相关规定；

（1）检验数量：同一生产厂家、同一批号且连续进场的胶凝材料，每 500t 为一批进行抽样，当不足 500t 时，按一批进行抽样。每批抽样不少于 1 次；平行检验或见证取样检测，抽检次数为施工单位抽检次数的 20%，且不少 1 次；

（2）检验方法：流态固化土生产应检查胶凝材料的出厂检验报告，并进行凝结时间和流态固化土强度试验。

4 基土应进行含水量、有机质含量和粒径的检测；

5 首次采用的配合比，应进行流态固化土的开盘鉴定检验。原材料的检测报告和流态固化土的试配检验报告、凝结时间、拌合物流动扩展度应符合设计要求；

（1）检查数量：同一配合比的流态固化土检查不应少于 1 次；

（2）检验方法：应检查开盘鉴定资料，测量拌合物凝结时间、拌合物流动扩展度。

6 流态固化土拌合物湿密度应满足设计要求；

（1）检查数量：对同一配合比的流态固化土，每拌 500m<sup>3</sup> 时，取样不得少于 1 次，每工作班拌制不足 500m<sup>3</sup> 时，取样不得少于 1 次，每段、每一层取样不得少于 1 次；

(2) 检验方法：检查拌合物湿密度的抽样检验记录。

#### 7 流态固化土拌合物流动扩展度应满足设计要求；

(1) 检查数量：对同一配合比的流态固化土，每拌  $500\text{m}^3$  时，取样不得少于 1 次，每工作班拌制不足  $500\text{m}^3$  时，取样不得少于 1 次，每段、每一层取样不得少于 1 次；

(2) 检验方法：检查拌合物流动扩展度的抽样检验记录。

#### 8 流态固化土强度检测应符合下列规定：

(1) 流态固化土应进行立方体抗压强度试验，其强度应满足设计要求。用于检测流态固化土强度的试件应在填筑地点随机取样制作并进行同条件养护。试件采用立方体试块，尺寸为  $70.7\text{mm}\times 70.7\text{mm}\times 70.7\text{mm}$ ；

(2) 检查数量：流态固化土试件留置组数应符合下列规定：每次填筑取样至少留置一组标准养护试件，同条件养护试件的留置组数根据现场需要确定；同一配合比连续填筑不大于  $500\text{m}^3$  时，应每次填筑制取一组试件；同一配合比连续填筑大于  $500\text{m}^3$  时，应按每  $500\text{m}^3$  制取一组试件；

(3) 检查方法：检查施工记录及强度试验报告；

(4) 同条件养护方法应符合下列规定：

1) 在具有代表性的填筑工作面合适位置（避免阳光直接照射），放置拆模后的流态固化土试件，用一层塑料布严密覆盖试件，然后覆盖麻袋并用水浇湿，在麻袋外再覆盖一层塑料布；

2) 每隔 3d 检查一次，当发现麻袋变干时，应揭开外层塑料布浇湿麻袋，再覆盖外层塑料布；

3) 当填筑工作面无合适位置，可在施工现场合适位置（避免阳光直接照射），开挖深度为  $0.5\text{m}\sim 1.0\text{m}$  的土坑，用于存放同条件养护试件。

#### 9 流态固化土顶层填筑完成后，应检查其施工标高，允许误差为 $\pm 20\text{mm}$ ；



(1) 检查数量：每 200m<sup>2</sup> 检查 3 点或每 10m 检查 1 点；

(2) 检验方法：采用水准仪测标高。

**10 流态固化土回填工程的验收应符合下列规定：**

(1) 原材料、成品应按相应质量标准进行检验，具有完整的检验资料；

(2) 填筑工程应按相应规定进行质量控制，各工序完毕后应进行自检，并形成文件。

**11 流态固化土填筑工程的验收应符合下列规定：**

(1) 现场取样的流态固化土标养试件平均值应满足设计强度；

(2) 当施工环境的日平均气温低于 20℃时，同条件养护试件可在等效龄期达到对应的标准养护龄期时再进行强度试验。同条件试件的强度数据应除以 0.85 后作为验收评定的强度数值；

(3) 当无法获取同条件养护试件的强度时，应在实际工程的固化土填筑体钻芯取样（龄期不少于 28d），测试其抗压强度。

**12 当设计对固化土的水稳系数、渗透系数、重金属浸出物毒性等提出要求时，其测试结果应符合设计要求；**

**13 当填筑工程质量验收不合格时，应进行缺陷修补或返工，并重新进行质量检验与验收。**

## **10 安全与环境保护**

### **10.1 一般规定**

10.1.1 低碳固化法处理地基设计和施工前应对现场环境因素进行辨识和评价，并应根据评价结果采取符合国家法律法规要求的保护措施。

10.1.2 采用建筑垃圾、矸石、弃渣等固废应加强原材料的重金属及有机污染物的检测，处理后的相关指标应满足国家环保要求。

10.1.3 施工过程的安全管理应符合现行国家标准《建筑与市政工程施工现场安全卫生与职业健康通用规范》GB 55034 的有关规定。

10.1.4 施工现场应设置安全环境保护牌，并应设置在醒目位置。

### **10.2 安全施工**

10.2.1 固化土实施前应根据工程类型、场地周边环境条件和施工过程中可能出现的安全隐患，编制有针对性的专项施工方案和应急预案。

10.2.2 施工前对有关人员进行安全、技术交底，并组织学习国家有关技术规程和安全操作规程；对于具有特殊工艺、具有一定危险性的施工，需经由专业培训过的人员操作，并持证上岗。

10.2.3 固废基胶凝材料应单独储存，并应防止受潮和混入杂物。出现结块的固废基绿色低碳胶凝材料不得用于土体固化。

10.2.4 雨季施工应采取防排水措施。

10.2.5 严禁在基坑（槽）周边影响范围内堆放土方及其他材料，基坑边坡的开挖坡比应符合相关技术标准或进行专项设计。

10.2.6 施工区域内流态固化土未初凝前，应采取拉设警戒带、安装防护栏、智能电子警戒提示器等措施，并派专人看护，避免行人及机动车辆陷入未凝固的固化土中。

10.2.7 施工前应对固化土专用搅拌设备、泵送压灌等设备和管路系统进行安全

检查，施工机械的使用应符合现行行业标准《建筑机械使用安全技术规程》JGJ33-2012 的规定。

10.2.8 当基坑开挖深度大于 3m（含 3m）时，施工单位应当在施工前编制专项施工方案，经相关单位审查通过后方可实施。当基坑开挖深度超过 5.0m 时，施工单位除应在施工前编制专项方案外，还应当组织专家对专项方案进行论证，通过后方可实施。

### **10.3 环境保护**

10.3.1 施工项目部应制定施工环境保护计划，落实责任人员，防止地下水污染和土壤侵蚀。低碳固化法施工过程的环境保护效果，宜进行自评估，并满足工业固体废物污染防治、大气及水污染物排放相关现行国家标准的相关规定。

10.3.2 固废基胶凝材料、一般工业固废的放射性和浸出毒性要求应符合现行国家标准的要求。施工中应落实个人防护、现场隔离等防护要求，同步开展放射性水平、有害物质浸出等指标监测，并采取粉尘控制、废水处理、固废合规处置等环保措施，确保施工全过程符合安全与环保相关规定。

10.3.3 建筑垃圾应分类存放、按时处置。收集、储存、运输或装卸建筑垃圾时应采取封闭措施或其他防护措施。

10.3.4 施工现场应设置排水沟和沉淀池，应采取沉淀、过滤、隔油等措施处理施工过程中产生的污水，不得直接排放。

10.3.5 粉料运输、固化土搅拌应采取覆盖、封闭等防尘措施。

10.3.6 施工作业应按现行行业标准《建筑施工场界环境噪声排放标准》GB 12523-2011 的规定，采用相应的降噪措施，降低施工噪声对环境的影响。

10.3.7 固化土生产过程中加强防尘、防噪声措施，采用密闭、通风、防尘措施，减少和杜绝工人接触粉尘机会；为工人提供符合标准的口罩、耳塞等劳保防护用品；施工中对可能接触有害物质的操作人员应采取有效的防护措施。

## 11 工程检验与验收

### 11.1 一般规定

11.1.1 质量检验与验收应分为施工过程控制、完成后质量验收两个阶段。

11.1.2 施工期间过程控制的内容应包括：验证施工机械性能，材料质量，固化土支护桩和型钢的定位、长度、标高、垂直度，试样的制作，垫层的压实系数、外加剂掺量及拼接焊缝质量等。

11.1.3 完成后质量验收时，主要应检查垫层的承载力、桩体的强度和搭接状况、型钢的位置偏差等。

11.1.4 应用固化土支护桩的基坑，开挖后应检查开挖面桩体的质量及渗漏水情况等。

### 11.2 固化土垫层检测要求

11.2.1 固态固化土检验与验收应符合下列规定：

地坪垫层、地基基础垫层、浅层原位固化等施工过程中，应随时对施工质量进行检测，固化土施工质量检测标准应符合表 11.2.1 的规定。

表 11.2.1 垫层施工质量检测标准

项次	项目	检测频率	规定值或允许偏差	检测方法
1	固化材料掺量（%）	每天汇总一次，取平均值	设计值的 $\pm 0.5$	计算机采集数据 计算
2	固化厚度（mm）	单个区域或每 200m 测试 点不少于 3 处	设计值的 $\pm 200$	静力触探或钻孔 取样
3	固化宽度（mm）		设计值的 $\pm 100$	米尺或其他长度 量测工具
4	压实系数	条形基础下垫层每 10m~20m 不应少于 1 个 点，独立柱基、单个基础下 垫层不应少于 1 个点，其他 基础下垫层每 50m <sup>2</sup> ~100m <sup>2</sup> 不应少于 1 个点。	$\geq 0.95$	环刀法

5	强度	不排水抗剪强度 (kPa) 或 静力触探锥尖阻力 (MPa)	单个区域或每 200m 测试 点不少于 3 处	不小于设计 要求	十字板剪切试验 或静力触探试验
6	承载力 (kPa)		单个区域或每 200m 测试 点不少于 1 处	不小于设计 要求	荷载板试验

采用环刀法检验固态固化土垫层的施工质量时,取样点应选择位于每层垫层厚度的 2/3 深度处。采用标准贯入试验或动力触探法检验垫层的施工质量时,每分层平面上检验点的间距不应大于 4m。

### 11.2.2 流态固化土垫层检验与验收应符合下列规定:

垫层应满足表 11.2.1 的要求,对垫层的施工质量可选用静力触探、轻型动力触探或标准贯入试验等方法进行检验。

11.2.3 竣工验收应采用静载荷试验检验垫层承载力,且每个单体工程不宜少于 3 个点;对于大型工程应按单体工程的数量或工程划分的面积确定检验点数。

## 11.3 固化土支护桩的检测要求

根据《建筑地基检测技术规范》JGJ 340、《型钢水泥土搅拌墙技术规程》JGJ/T 199 进行质量检验,检验内容主要包括灌注桩、型钢质量的检测及流态土强度和外观质量等内容。

测定固化土流动度时,采用金属或硬质塑料筒体,内径 75mm,高 150mm,流动度控制要求根据具体工程需求确定。

11.3.1 咬合式排桩灌注固化土前,应对已成孔的中心位置、孔深、孔径、垂直度、孔底沉渣厚度进行检验,成孔质量应符合表 11.3.1 的规定。

表 11.3.1 桩基成孔允许偏差及检测要求

序号	检查项目	允许偏差 (mm)	检测数量	检测方法
1	孔径	±30	全数检查	检测套筒直径
2	垂直度	1/300		测斜仪
3	孔深	±300		核定钻杆高度或用测绳
4	桩位	±10		对照轴线用钢尺检测

11.3.2 焊接型钢焊缝质量应符合设计要求和现行行业标准《焊接 H 型

钢》YB 3301 和《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ81 的有关规定。H 型钢的允许偏差应符合表 11.3.2-1 的规定。型钢固化土支护桩施工时，型钢的插入允许误差应符合表 11.3.2-2 的规定。

表 11.3.2-1 H 型钢允许偏差及检测要求

序号	检查项目	允许偏差 (mm)	检测数量	检测方法
1	截面高度	$\pm 5$	每根	用钢尺量
2	截面宽度	$\pm 3$	每根	用钢尺量
3	腹板厚度	-1.0	每根	用游标卡尺量
4	翼缘板厚度	-1.0	每根	用游标卡尺量
5	型钢长度	$\pm 50$	每根	用钢尺量
6	型钢挠度	L/500	每根	用钢尺量

表中 L 为型钢长度。

表 11.3.2-2 H 型钢插入允许偏差及检测要求

序号	检查项目	允许偏差(mm)	检测数量	检测方法
1	型钢顶标高	$\pm 50$	每根	水准仪测量
2	型钢平面位置	50mm (平行于基坑边线)	每根	用钢尺量
3	形心转角	3°	每根	量角器测量

### 11.3.3 固化土试块强度的检测

按配合比进行固化土拌合，装入试验模具。模具尺寸为 70.7mmx70.7mmx70.7mm，试件的搅拌、成型与养护、试验方法及结果的处理应按现行行业标准《水泥土配合比设计规程》JGJ/T 233 的规定执行。

11.3.4 基坑开挖前应检验固化土支护桩的桩身强度，强度指标应符合设计要求。桩身强度宜采用钻芯强度试验确定。

11.3.4.1 钻取桩芯强度试验应钻取施工后 28d 龄期的流态土芯样，钻取的芯样应立即密封并及时进行无侧限抗压强度试验。抽检数量不应少于总桩数的 2%，且不得少于 3 根。每根桩的取芯数量不宜少于 5 组，每组不宜少于 3 件试

块。取芯开孔位置宜在距桩中心 0.15D~0.25D 的范围内均匀对称布置。

11.3.4.2 钻取芯样宜采用液压操纵的高速工程地质钻机，并配备相应的水泵、孔口管、扩孔器、卡簧、扶正稳定器及可捞取松软渣样的钻具。宜采用双管单动或更有利于提高芯样采取率的钻具。钻杆应顺直，钻杆直径宜为 50mm。

11.3.4.3 钻取芯样钻机应根据身设计强度选用合适的薄壁合金钢钻头或金刚石钻头，钻头外径不宜小于 91mm。锯切芯样试件用的锯切机应具有冷却系统和夹紧牢固的装置；芯样试件端面的补平器和磨平机应满足芯样制作的要求。

11.3.4.4 试验抗压试件直径不宜小于 70mm，试件的高径比宜为 1:1；抗压芯样应进行密封，避免晾晒，芯样加工时应将芯样固定，锯切平面垂直于芯样轴线。当锯切后的芯样试件不满足平整度及垂直度要求时（沿试件高度任一直径与平均直径相差达 2mm 以上时；试件端面的不平整度在 100mm 长度内超过 0.1mm 时；试件端面与轴线的不垂直度超过 2°时），应进行端面加工。

11.3.4.5 芯样试件制作完毕可立即进行抗压强度试验：

试验机宜采用高精度小型压力机，试验机额定最大压力不宜大于预估压力的 5 倍，芯样试件抗压强度应按下式计算确定：

$$f_{cu} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (11.3.4.5-1)$$

$f_{cu}$  芯样试件抗压强度（MPa），精确至 0.01MPa；

$P$  芯样试件抗压试验测得的破坏荷载（N）；

$d$  芯样试件的平均直径（mm）。

桩身芯样试件同一段抗压强度代表值应按一组三块试件强度值的平均值确定。

流态土芯样试件抗压强度代表值应取各段流态土芯样试件抗压强度代表值

中的最小值。

对单位工程同一条件下的受检桩,应取桩身芯样试件抗压强度代表值进行统计,并按下列公式分别计算平均强度、标准差和变异系数。

$$\bar{q}_{uf} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{ufi}}{n} \quad (11.3.4.5-2)$$

$$\sigma_{uf} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{q}_{uf} - q_{ufi})^2} \quad (11.3.4.5-3)$$

$$\delta_{uf} = \frac{\sigma_{uf}}{\bar{q}_{uf}} \times 100\% \quad (11.3.4.5-4)$$

式中:  $q_{ufi}$ --单桩的芯样试件抗压强度代表值 (kPa);

$\bar{q}_{uf}$ --检验批水泥土桩的芯样试件抗压强度平均值 (kPa);

$\sigma_{uf}$ --桩身抗压强度代表值的标准差 (kPa);

$\delta_{uf}$ --桩身抗压强度代表值的变异系数;

$n$ --受检桩数;

并按按下式计算桩身强度标准值:

$$\gamma_s = 1 - \left\{ \frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right\} \delta \quad (11.3.4.5-5)$$

$$\phi_k = \gamma_s \phi_m \quad (11.3.4.5-6)$$

$\phi_k$ --原位试验数据的标准值;

$\gamma_s$ --统计修正系数。

**11.3.4.6 固化土咬合桩中关于钢筋混凝土桩的检验要求**,按现行行业标准《咬合式排桩技术标准》JGJ/T 396 的有关规定执行。

**【条文说明】**芯样应在全桩长范围内连续钻取的桩芯上选取,取样点应取沿桩长不同深度和不同土层处的 5 点,且在基坑坑底附近应设取样点。钻取桩芯



得到的试块强度，由于钻取桩芯过程和试验中会对流态土产生一定程度上损伤；钻孔取芯完成后，芯样暴露在空气中会导致水分的流失，取芯后制作试块的过程中会产生较大扰动等原因导致流态土试块的强度偏低，因此试验得到的搅拌桩强度，应乘以 **1.2~1.3** 的系数，钻孔取芯完成后的空隙应注浆填充。

#### **11.3.4.7 试件端面加工方法应符合下列规定：**

- 1** 在磨平机上磨平；
- 2** 用水泥砂浆、水泥净浆等材料补平；水泥砂浆或水泥净浆的补平厚度不宜大于 **5mm**，补平层应与芯样结合牢固，受压时补平层与芯样的结合面不得提前破坏；
- 3** 芯样试件高度不得小于 **0.95d** 或大于 **1.05d** 时（**d** 为芯样试件平均直径）。

**11.3.5** 检验项目存在不满足规范要求时，应根据具体情况采取返工、补强等处理措施，处理后应重新进行检验，直至符合设计和规范要求。

## 附录 A 流态固化土流动扩展度测试方法

A.0.1 本试验用于测试超流态固化土的流动扩展度，评价其流动性能。

A.0.2 试验材料应符合本标准第 4 章的规定。当土样含有大颗粒时，应进行破碎，筛去 10mm 以上颗粒后备用。

A.0.3 试验仪器等应符合现行行业标准《水泥土配合比设计规程》JGJ/T 233-2011 的规定，并应包括下列内容：

- 1 边长不小于 500mm 的玻璃平板或金属平板 1 块；
- 2 水准仪 1 个；
- 3 测试筒：圆柱筒 1 个，其上下开口内径应为  $75\pm 1\text{mm}$ ，高应为  $150\pm 1\text{mm}$ ，内壁应光滑，壁厚不应小于 5mm，圆柱筒两端平齐光滑。圆柱筒材质宜为高分子塑料或钢；
- 4 钢尺 1 把，量程为 500mm，精度为 1mm。

A.0.4 流态固化土流动扩展度试验应按下列步骤进行：

- 1 将平板放置于水平桌面或地面上，采用水准仪测试并调整平板，使其在两个垂直方向上均保持水平；
- 2 用湿毛巾擦拭平板，使其保持润湿状态；
- 3 将测试筒的一端竖直放置在平板中心位置处，让测试筒的一个端面与平板紧密接触；
- 4 将搅拌好或从现场取样的固化土拌和物，分两次装入测试筒中；每装入一次，采用捣棒均匀插捣 5 次；
- 5 最后用抹刀将拌和物沿测试筒上端面刮平，擦去测试筒外壁和平板上的粘留物；
- 6 将测试筒垂直向上一一次性拔起，拌和物坍落后在平板上形成饼状物。用钢尺在最大直径方向及其垂直方向上分别测量饼状物的直径，精确到 5mm，两

直径之平均值即为超流态固化土流动扩展度。

## 附录 B 流态固化土悬浮性测试方法

B.0.1 本试验用于测试流态固化土的悬浮性,检测浆液固结过程中沿垂直方向的密度变化,是评价浆液稳定性的重要指标。

B.0.2 试验材料应符合本标准第 4 章的规定。当土样含有大颗粒时,应进行破碎,筛去 10mm 以上颗粒后备用。

B.0.3 试验仪器等应符合现行行业标准《水泥土配合比设计规程》JGJ/T 233-2011 的规定,并应包括下列内容:

1 测试筒:内径 $\phi 150\text{mm}$ ,高度 500mm 且在同一侧从底部等间隔 100mm 设置有 3 个孔径 $\phi 20\text{mm}$  的量筒 1 个;

2 电子秤(精度 0.01g) 1 台;

3 烧杯若干。

B.0.4 流态固化土悬浮性试验应按下列步骤进行:

1 用孔塞将测试筒上的三个排浆孔严密封堵,将新拌均匀的流态固化土倒入测试筒内 400mm 刻度线处放置于水平面,常温下静置 30min;

2 取 1 个干净烧杯称重标记  $m_0$ ,将达到静置 30min 时的测试筒上部第一个孔塞去除并用烧杯承接浆液直至浆液不再排出,再次称重标记  $m_1$ 。上层悬浮液密度 $\rho_{\text{上}}$ 应按下式计算:

$$\rho_{\text{上}} = \frac{m_1 - m_0}{V_{\text{上}}} \quad (\text{B.0.4-1})$$

3 参照步骤 2,依次去除第 2 个和第 3 个孔塞,分别测得  $m_2$  和  $m_3$ 。中层和下层浆液密度 $\rho_{\text{中}}$ 和 $\rho_{\text{下}}$ 应按下式计算:

$$\rho_{\text{中}} = \frac{m_2 - m_0}{V_{\text{中}}} \quad (\text{B.0.4-2})$$

$$\rho_{\text{下}} = \frac{m_3 - m_0}{V_{\text{下}}} \quad (\text{B.0.4-3})$$

三层密度的测试应在 2min 内测量完成。

4 各层浆液密度的平均值 $\rho$ 、标准差 $\sigma$ 和变异系数  $C_v$ 应分别按下式计算：

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_{\text{上}} + \rho_{\text{中}} + \rho_{\text{下}}}{3} \quad (\text{B.0.4-4})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (\rho_i - \bar{\rho})^2}{2}} \quad (\text{B.0.4-5})$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{\rho}} \quad (\text{B.0.4-6})$$

## 附录 C 流态固化土沉缩比测试方法

C.0.1 本试验用于测试流态固化土的沉缩比，评价流态固化土凝固后的固结比。

C.0.2 试验材料应符合本标准第 4 章的规定。当土样含有大颗粒时，应进行破碎，筛去 10mm 以上颗粒后备用。

C.0.3 试验仪器等应符合现行行业标准《水泥土配合比设计规程》

JGJ/T 233-2011 的规定，并应包括下列内容：

- 1 1000ml 量筒 1 个；
- 2 电子秤（精度 0.01g）1 台；
- 3 烧杯若干。

C.0.4 流态固化土沉缩比试验应按下列步骤进行：

1 将搅拌均匀的新拌超流态固化土浆液注入量筒内至 1000ml 刻度线，称取量筒和浆液总质量  $m_1$ ；

2 将量筒密封，放置于标准养护室内养护 7d，养护期间量筒保持密封；

3 达到养护时间，去除密封，观察浆液固结情况，然后将量筒缓慢倒置并保持 1min，排空量筒内自由水，再称取量筒和结石体共同质量  $m_2$ ；

4 沉缩比  $K_v$  应按下列式计算：

$$K_v = (1 - \frac{m_1 - m_2}{1000}) \times 100\% \quad (\text{C.0.4})$$

按照上述试验步骤三次试验取平均值。

## 本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对于要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他标准执行的写法为：“应符合……的规定(或要求)”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

- 1 《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003
- 2 《工程测量通用规范》GB 55018
- 3 《建筑与市政工程施工质量控制通用规范》GB 55032
- 4 《建筑与市政工程施工现场安全卫生与职业健康通用规范》GB 55034
- 5 《建筑施工场界环境噪声排放标准》GB 12523
- 6 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 7 《土工试验方法标准》GB/T 50123
- 8 《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202
- 9 《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300
- 10 《建筑变形测量规范》JGJ 8
- 11 《建筑地基处理技术规范》JGJ 79
- 12 《建设工程施工现场环境与卫生标准》JGJ 146