

TMAC

# 团 体 标 准

T/TMAC xxx-xxxx

---

## 多层互剪搅拌桩技术规程

Technical Specifications for Contra-rotational Shear

Deep Soil Mixing Column

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

已授权的专利证明材料为专利证书复印件或扉页，已公开但尚未授权的专利申请证明材料为专利公开通知书复印件或扉页，未公开的专利申请的证明材料为专利申请号和申请日期。

xxxx-xx-xx 发布

xxxx-xx-xx 实施

---

中国技术市场协会

发 布



中国技术市场协会（TMAC）是科技领域内国家一级社团，以宣传和促进科技创新，推动科技成果转移转化，规范交易行为，维护技术市场运行秩序为使命。为满足市场需要，做大做强科技服务业，依据《中华人民共和国标准化法》《团体标准管理规定》，中国技术市场协会有序开展标准化工作。本团体成员和相关领域组织及个人，均可提出修订 TMAC 标准的建议并参与有关工作。TMAC 标准按《中国技术市场协会团体标准管理办法》《中国技术市场协会团体标准工作程序》制定和管理。TMAC 标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议多数专家、成员的同意，方可予以发布。

在本文件实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料反馈至中国技术市场协会，以便修订时参考。

本文件版权归中国技术市场协会所有。除了用于国家法律或事先得到中国技术市场协会正式授权或许可外，不许以任何形式复制本文件。第三方机构依据本文件开展认证、评价业务，须向中国技术市场协会提出申请并取得授权。

中国技术市场协会地址：北京市海淀区复兴路甲 23 号城乡大厦 12 层 1217—1223

邮政编码：100036

电话：010-68270447 传真：010-68270453

网址：[www.ctm.org.cn](http://www.ctm.org.cn)

电子信箱：[136162004@qq.com](mailto:136162004@qq.com)

目次

前 言 ..... III

引 言 ..... V

1. 总则 ..... 1

2. 术语和符号 ..... 4

    2.1 术语 ..... 4

    2.2 符号 ..... 4

3. 基本规定 ..... 6

4. 设计 ..... 8

    4.1 一般规定 ..... 8

    4.2 选型与布置 ..... 8

    4.3 设计计算 ..... 9

5. 装备 ..... 12

    5.1 一般规定 ..... 12

    5.2 搅拌系统与辅助系统 ..... 12

    5.3 数字化测控管理系统 ..... 13

6. 施工 ..... 14

    6.1 一般规定 ..... 14

    6.2 施工方法 ..... 16

    6.3 施工过程管理 ..... 19

7. 质量控制 ..... 20

    7.1 一般规定 ..... 20

    7.2 施工检验 ..... 20

附录 A ..... 23

附录 B ..... 24

附录 C ..... 25

附录 D ..... 26

附录 E ..... 27



## 前 言

本文件按照《公路工程标准编写导则》(JTG A04-2013)的规定起草。

本文件由中国技术市场协会交通运输专业委员会提出，由中国技术市场协会归口。受中国技术市场协会委托，由主编单位负责具体解释工作，请有关单位将实施中发现的问题与建议反馈至浙江坤德创新岩土工程有限公司（地址：浙江省宁波高新区光华路 299 号研发园 C9 幢 8 楼；联系电话：13906520179；电子邮箱：maxh@kundeyt.com），供修订时参考。

**主编单位：**浙江坤德创新岩土工程有限公司、浙江工业大学。

**参编单位：**浙江交工集团股份有限公司、浙江大学、浙江数智交院科技股份有限公司、浙江交工宏途交通建设有限公司、交科院环境科技（北京）有限公司、广州地铁设计研究院股份有限公司、广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司、中冶建筑研究总院有限公司、温州大学、宁波市交通规划设计研究院有限公司、广州市市政工程设计研究总院有限公司、厦兴科技（浙江）有限公司、武汉理想共达环境岩土技术有限公司、广东成方建筑工程有限公司、上海协骋岩土科技有限公司、浙江鼎业基础工程有限公司。

**主要起草人：**马晓华、蔡袁强、杨仲轩、史海欧、刘钟、沈坚、戴显荣、毛斌、曾怀武、武可爽、刘吉福、段冰、曾嵘、彭熙建、蒋华龙、徐文田、朱宝林、薛子洲、孙宏磊、潘晓东、王军、江建坤、陈新国、单君、王开太、张楚福、朱斌科、文磊、陈天雄、王鹏、谢波涛、王瑞春、李正西、李斌、李朝阳、代仁平、王福林。

**审查专家：**



## 引 言

根据中国技术市场协会的要求，针对多层互剪搅拌桩在公路工程中的应用，编制组在广泛调查研究、认真总结现场试验科研成果以及工程实践经验的基础上，参照有关国家和行业标准，制定本文件。

本文件分为七章和五个附录：总则，术语和符号，基本规定，设计，装备，施工，质量控制。

请注意本文件中的某些内容可能涉及专利《一种具有双向旋搅机构的智能钻机装备及施工方法》(ZL 202210127239.X)、《一种智能制浆供浆的控制装置及其使用方法》(ZL 202210505720.8)等相关专利，其受到法律保护，使用者在使用前应获得专利权人的专利实施许可。

专利持有人已向本文件的发布机构作出专利实施许可声明:愿意同任何申请人在公平、合理和非歧视基础上,就专利实施许可进行洽谈合作。有关内容可从以下联系方法获得:

专利持有人：浙江坤德创新岩土工程有限公司

地址：浙江省宁波高新区光华路 299 号研发园 C9 幢 8 楼

邮政编码：315100

联系人：马晓华

Email: maxh@kundeyt.com

请注意除上述专利外，本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

# 多层互剪搅拌桩技术规程

## 1. 总则

1.0.1 为规范多层互剪搅拌桩的工程应用，使其符合安全可靠、技术先进、经济合理、环境友好的要求，制订本规程。

### 条文说明

多层互剪搅拌桩是一种新型搅拌桩技术，有效解决了传统搅拌桩施工效率低、成桩质量差、有效处理深度浅等问题。多层互剪搅拌技术：采用新型搅拌装备，通过数字化测控系统进行自动化施工，由大功率动力头通过同轴双层钻杆驱动框架式互剪搅拌钻具，框架式互剪搅拌钻具上交错分布的搅拌翼板可以实现对原位土体与固化剂浆液形成立体空间的多路径、多层次、相对剪切搅拌，形成质量可控的加固土体。其中掘进叶片上的线型喷浆可以满足50m施工深度范围内固化浆液在大直径桩体中均匀分布和均匀搅拌；数字化测控系统对施工过程中的工艺参数进行监测、显示、记录，并控制注浆泵在桩身各段的恒量或变量喷浆。

多层互剪搅拌桩具有桩身强度高，均匀性、连续性好，施工效率高的特点，能有效节约固化材料成本，保护环境，对比传统单轴搅拌桩在技术、经济、环保方面有突出优势。

在多个工程项目中，对多层互剪搅拌工法成桩强度及均匀性、自动化施工水平进行了进一步研究与验证，具体情况如下：

#### 1 桩身强度及均匀性

(1) 苏台高速公路南浔至桐乡段及桐乡至德清联络线（二期），改造练市枢纽为五路交叉口枢纽。采用多层互剪搅拌桩作高速公路软基处理，桩径700mm，桩间距2100mm，正三角形布置，水泥掺量108kg/m。场地所在区域软土以②<sub>2</sub>淤泥质粉质黏土为主，流塑状，埋深浅，含水量高，总厚度6.1~17.6m。桩身的芯样采取率达到90%左右，桩体的28天无侧限平均抗压强度大于2.5MPa，上中下三个部位芯样检验强度基本一致。

(2) 浙江海上风电大容量风机制造与出口基地项目（一期），采用多层互剪搅拌桩作复合地基处理。项目地处温州滨海淤积平原，地貌属滨海相沉积地貌单元，处理深度范围内为新近充填淤泥层及淤泥质黏土层，桩径700mm，桩间距1500mm 三角形布置，复合地基承载力特征值为150kPa。7天取芯桩身平均强度1.85MPa，49天取芯桩身平均强度3.14MPa。

(3) 南沙至珠海(中山)城际(万顷沙-兴中段)盾构区间地基处理加固项目，采用多层互剪搅拌桩对淤泥、淤泥质土进行地基加固，满足盾构施工的要求。实际施工桩径1500mm，桩长最高达47.1m，实现桩身全长取芯，芯样完整、连续，在不同土层中28天取芯桩身平

均强度达到 2~5MPa。



图 1.1 南沙至珠海(中山)城际(万顷沙-兴中段)盾构区间地基处理芯样照片

2 自动化施工

CS-DSM 工法装备配置了数字化智能测控系统，能够实现搅拌桩全过程自动化施工、实时记录和监控施工过程参数、并对施工异常情况进行预警等功能。操作界面上可实时显示施工装备的电流、浆液流量、深度等信息，并通过计算显示桩身每半米实际用灰量，做到施工过程质量可视化。

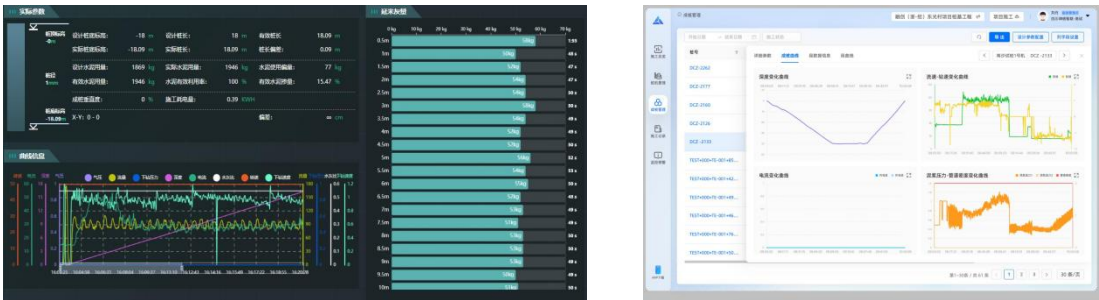


图 1.2 CS-DSM 工法数字化智能测控系统操作界面、Web 监控界面

1.0.2 本规程适用于软土地区公路工程中多层互剪搅拌桩的设计、装备、施工和质量控制。

条文说明

多层互剪搅拌桩技术自研发以来，已在浙江、广东的公路、轨交工程领域得到推广应用，以其桩身强度高，均匀性、连续性好，有效处理深度大的技术优势，有效解决了深厚软土中水泥土搅拌桩成桩质量差的施工技术问题，取得了显著的经济和社会效益。为规范本工法的

推广应用，本规程对多层互剪搅拌桩的设计、装备、施工及质量控制各环节作相关规定。多层互剪搅拌桩在轨交、市政、建筑等工程的应用可参考本规程。

1.0.3 多层互剪搅拌桩的设计与施工，应遵循因地制宜、保护环境、节约资源的原则，根据岩土工程勘察成果资料，综合考虑荷载工况、施工条件和场地环境条件，精心设计、精细施工，严格质量管理。

1.0.4 多层互剪搅拌桩的设计、施工和质量控制除应符合本规程规定以外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

#### **条文说明**

多层互剪搅拌桩属于水泥土深层搅拌桩，其勘察、设计、施工和质量控制各环节除需满足本规程以外，尚需执行现行水泥土深层搅拌桩的各种规范、规程及其他相关标准。

## 2. 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 多层互剪搅拌桩 Contra-rotational shear deep soil mixing column

采用专用搅拌装备，通过数字化测控系统进行自动化施工，由大功率动力头通过同轴双层钻杆驱动框架式互剪搅拌钻具，钻具上交错分布的搅拌翼板在施工过程中实现对原位土体的多层次正反向旋转剪切对搅，使掘进钻头上线型喷浆口喷出的固化剂浆液和地基土体均匀混合，形成具有较高强度的水泥搅拌桩体。

#### 2.1.2 同轴双层钻杆 Coaxial double-layer drill pipe

采用同轴双层管嵌套设计，内部能布置 1 条以上供浆通道、由动力头驱动实现内外钻杆正反向旋转的钻杆结构。

#### 2.1.3 框架式互剪搅拌钻具 Frame-type contra-rotational shear mixing drill tools

由能实现同轴正反向旋转的带搅拌翼板的外框架和内部多层搅拌翼板组成，可进行正反向旋转剪切对搅功能的钻具。

#### 2.1.4 数字化测控系统 Digital measurement and control system

由智能监测子系统与智能变频供浆控制子系统构成。智能监测子系统功能通过各类传感器对施工过程中的工艺参数进行实时感知、采集、显示、存储、报警及云平台信息传输。智能变频供浆控制子系统利用喷浆优化算法及反馈控制技术实现注浆泵在细分桩段的恒量或变量喷浆。

### 2.2 符号

$f_{spk}$  —— 复合地基承载力特征值

$f_{sk}$  —— 桩间土承载力特征值

$q_{si}$  —— 第  $i$  层土的桩侧摩阻力特征值

$q_p$  —— 桩端土地基承载力特征值

$R_a$  —— 单桩竖向抗压承载力特征值

$A_p$  —— 桩体截面面积

$u$  —— 桩体周长

$l_i$  —— 桩长范围内第  $i$  层土的厚度

$d$  —— 桩体直径

$d_e$  —— 单桩分担的处理地基面积的等效圆直径

$m$  ——复合地基置换率

$\alpha$  ——桩端土承载力折减系数

$\beta$  ——桩间土承载力折减系数

$\eta$  ——桩体强度折减系数

### 3. 基本规定

3.0.1 多层互剪搅拌桩适用于素填土、淤泥、淤泥质土、黏性土、粉土、砂土、饱和黄土等地层。对泥炭、泥炭质土、有机质土、污染土、塑性指数  $I_p$  大于 25 的黏土、pH 值小于 4 的酸性土和地下水具有腐蚀性，以及无工程经验的地区时，应通过现场试验确定其适用性。

#### 条文说明

泥炭、泥炭质土、有机质土、污染土、酸性土、地下水具有腐蚀性的地层中含有影响搅拌桩固化剂硬化的成分，会对搅拌桩的质量造成不利的影响。对有不影响地层和特殊土地层，应结合地区经验考虑其特殊性质的影响，并通过现场试验确定多层互剪搅拌桩的适用性后，方可按本规程相关内容进行设计和施工。

3.0.2 多层互剪搅拌桩可用于公路工程的复合地基及其它各类土体加固处理。

#### 条文说明

多层互剪搅拌桩主要应用于公路工程的复合地基处理。基坑工程、轨交工程、各类城市隧道、管廊及工作井加固等工程应用可参考本规程。

3.0.3 多层互剪搅拌桩设计与施工前，应掌握施工区域的工程地质和水文地质资料、地基设计资料，查明不良地质条件、地下障碍物以及邻近既有建（构）筑物、市政设施等周边环境条件。

#### 条文说明

多层互剪搅拌桩的设计与施工应重视工程资料的收集，综合工程地质和水文地质条件，地基处理、周边环境、工期等要求，提出技术可行的方案进行经济比选。

3.0.4 多层互剪搅拌桩复合地基设计应进行稳定验算和沉降计算；当地基加固深度以下的受力层范围内有软弱下卧层时，尚应进行软弱下卧层地基承载力验算；对工后沉降控制要求较严的复合地基应按沉降控制的原则进行设计。

#### 条文说明

多层互剪搅拌桩复合地基属于公路工程中加固土桩处理地基，可按照现行行业标准《公路路基设计规范》JTG D30 和《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02 的有关规定执行；多层互剪搅拌桩复合地基同时也是复合地基的一种，对于复合地基设计公路规范未详处可按照现行国家标准《复合地基技术规范》GB/T 50783 的有关规定执行。

3.0.5 多层互剪搅拌桩正式施工前应通过试成桩确定施工工艺和施工参数；正式施工时应根据试成桩确定的施工参数，由数字化测控系统自动监测、记录成桩过程的施工参数，并对成

桩过程的参数进行监控和预警。

#### 条文说明

为满足设计要求，正式施工前应进行工艺性成桩试验，目的是获得满足施工图设计要求的施工工艺参数和质量控制与保证方法，包括：固化剂掺入比、水灰比、喷浆压力、搅拌次数、钻杆下沉和提升速度、转速、进入持力层电流等。

3.0.6 多层互剪搅拌桩应根据设计要求对使用的原材料、水灰比、固化剂掺入比及桩身质量进行检验，质量检验应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》JTG F80/1 和《公路路基施工技术规范》JTG/T 3610 的有关规定。

3.0.7 多层互剪搅拌桩施工期间，应保证施工安全，对涉及施工安全、周边环境安全及可能危及人身安全的对象采取保护措施，进行工程监测，并遵循信息化施工原则。

#### 条文说明

多层互剪搅拌桩施工期间，施工安全和环境保护可以根据现行行业标准《公路路基施工技术规范》JTG/T 3610 执行；

## 4. 设计

### 4.1 一般规定

#### 4.1.1 多层互剪搅拌桩设计前应收集并具备下列资料：

- 1 场地岩土工程勘察报告；
- 2 场地内不良地质条件、地下障碍物等调查资料；
- 3 场地周边建（构）筑物、市政管线等环境调查资料；
- 4 类似工程的实施经验及应用效果。

4.1.2 设计前宜进行拟处理土体的室内配比试验，针对现场拟处理土体的性质，选择固化剂和外掺剂的类型及其掺入比。采用水泥作为固化剂时，应采用强度等级 42.5 级及以上的水泥；根据工程需要和土质条件选用其他土体硬化材料作为固化剂时，宜通过拟加固土的室内试验确定固化剂的型号、掺入比以及各龄期强度参数。

#### 条文说明

多层互剪搅拌桩固化剂宜采用室内配合比试验，以获得满足设计强度要求的掺入比。

固化剂为水泥的固化土强度宜取 28d 龄期试块的立方体抗压强度平均值。

多层互剪搅拌桩除了采用水泥作为固化剂外，还可以根据工程需要和土质条件选用其他类型的固化剂。如采用其他类型的固化剂，其掺入比和水灰比等参数要求应按照相关规范的有关规定执行。

本规程规定的掺入比是指单位体积内固化剂掺入重量与天然土体重量之比。

4.1.3 多层互剪搅拌桩桩身芯样的 28d 无侧限抗压强度标准值应满足设计要求，且不应小于 1.5MPa。

4.1.4 浆喷法的固化剂浆液水灰比应根据设计强度要求、室内配比试验结果、喷浆稳定性等综合选用，宜为 0.6~1.2；当有早期强度要求时宜取低值。

4.1.5 多层互剪搅拌桩的桩径不宜大于 2000mm；多层互剪搅拌桩设计深度不宜大于 50m；多层互剪搅拌桩的垂直度偏差应满足设计要求，且不应大于 1/100。

### 4.2 选型与布置

4.2.1 多层互剪搅拌桩的桩径、桩长、桩间距应根据复合地基的承载力和变形要求等综合确定；平面布置宜采用正方形、等边三角形或矩形布置形式；桩间距不宜大于 4 倍桩径。

4.2.2 多层互剪搅拌桩的深度宜穿透软土层到达承载力相对较高的土层；为提高抗滑稳定性而设置的桩体，其桩长应超过危险滑弧面以下不小于 2m。

4.2.3 多层互剪搅拌桩复合地基宜设置褥垫层，垫层设置范围、厚度和垫层材料，应根据复合地基的形式、桩土相对刚度和工程地质条件等因素确定。褥垫层厚度宜为 300mm~400mm；置换率低时垫层厚度可取大值，置换率高时可取小值；褥垫层宜选用中砂、粗砂、级配砂石或碎石等，且碎石最大粒径不宜大于垫层厚度的 1/3；桩间距较大或加固土体为淤泥等软弱土时，垫层可设置土工格栅等加筋材料。

#### 条文说明

根据复合地基桩土共同作用协调变形的要求，《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02 中规定加固土桩应在桩顶设置垫层；《复合地基技术规范》GB/T 50783 中规定深层搅拌桩复合地基顶部宜设置垫层。

### 4.3 设计计算

4.3.1 多层互剪搅拌桩复合地基承载力计算，应符合下列规定：

- 1 多层互剪搅拌桩单桩承载力特征值应通过现场单桩竖向抗压载荷试验确定。
- 2 初步设计时，由桩周土和桩端土可能提供的单桩竖向抗压承载力特征值可按公式（4.3-3）进行估算；由桩身强度可能提供的单桩竖向抗压承载力特征值可按公式（4.3-4）估算；取以上两个计算值的较小值作为单桩竖向抗压承载力特征值；

$$R_a = u \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \dots\dots\dots (4.3-3)$$

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \dots\dots\dots (4.3-4)$$

式中：

- $u$  —— 桩体周长（m）；
- $q_{si}$  —— 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；
- $\alpha$  —— 桩端土承载力折减系数，对淤泥、淤泥质土、流塑状软土可取 0.4~0.6；  
对其他土层，可取 0.5~1.0；
- $q_p$  —— 桩端土地基承载力特征值（kPa）；
- $\eta$  —— 桩体强度折减系数，可按 0.3~0.4 取值；
- $f_{cu}$  —— 桩身抗压强度平均值，可按设计配合比由室内制备的水泥土试件测得 28d  
无侧限抗压强度（kPa）；

3 多层互剪搅拌桩复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定。

4 搅拌桩复合地基初步设计时，宜按下列公式估算复合地基承载力特征值：

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta (1-m) f_{sk} \dots\dots\dots (4.3-1)$$

$$m = d^2 / d_e^2 \dots\dots\dots (4.3-2)$$

式中：

$f_{spk}$  —— 复合地基承载力特征值（kPa）；

$R_a$  —— 单桩竖向抗压承载力特征值（kN）；

$A_p$  —— 桩体截面面积（m<sup>2</sup>）；

$\beta$  —— 桩间土承载力折减系数，宜按当地经验取值，如无经验时，对淤泥、淤泥质土、流塑状软土取 0.1~0.4，其它土层根据地质、工程情况综合分析，可取 0.4~0.8。

$f_{sk}$  —— 桩间土地基承载力特征值（kPa）；

$m$  —— 复合地基置换率；

$d$  —— 桩体直径（m）；

$d_e$  —— 单根桩分担的处理地基面积的等效直径(m)，等边三角形布置时， $d_e = 1.05L$ ；

正方形布置时， $d_e = 1.13L$ ；矩形布置， $d_e = 1.13 \sqrt{L_1 \bullet L_2}$ ， $L$ 、 $L_1$  和  $L_2$  分别为桩间距、纵向桩间距和横向桩间距（m）；

5 当多层互剪搅拌桩加固深度以下的受力层范围内存在软弱下卧层时，应进行下卧层承载力验算。下卧层承载力验算可根据《公路路基设计规范》JTG D30 相关规定计算。

#### 条文说明

多层互剪搅拌桩单桩竖向抗压承载力特征值的计算：

$\alpha$  为桩端天然地基土承载力折减系数，与增强体的荷载传递性质和、增强体的长度以及桩土相对刚度密切相关。区别于传统搅拌工艺，多层互剪搅拌工艺形成的桩体连续性、整体性较好，桩端土的承载力可以更大程度发挥，根据单桩极限承载力的理论计算值和实际静载荷结果对比分析，当多层互剪搅拌桩的桩端位于非软弱土层中，根据桩长及桩端土的物理力学性质综合分析，桩端土的承载力折减系数可取 0.5~1.0。

$\eta$  为桩身强度折减系数,《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02、《复合地基技术规范》GB/T 50783 的规定:浆喷法可取 0.25~0.33;由于多层互剪搅拌工艺能显著提高搅拌均匀性和桩身强度,现场取芯试验及静载荷试验也表明,多层互剪搅拌桩现场芯样强度和单桩承载力相较传统搅拌桩工艺有显著提升,故适当提高取值为 0.3~0.4。

多层互剪搅拌桩复合地基承载力:

$\beta$  为桩间土承载力折减系数,《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02、《复合地基技术规范》GB/T 50783 规定:当桩端土未经修正的承载力特征值大于桩周土地基承载力特征值的平均值时, $\beta$  可取 0.1~0.4,差值大时应取低值;当桩端土未经修正的承载力特征值小于或等于桩周土地基承载力特征值的平均值时,可取 0.50~0.95,差值大时应取高值;行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ79 的规定,当加固土层为淤泥、淤泥质土和流塑状软土时,桩间土难以发挥承载作用, $\beta$  取 0.1~0.4,固结度程度好或设置褥垫层时可取高值;其他土层可取 0.4~0.8;加固土层强度高或设置褥垫层时取高值,桩端持力层土层强度高时取低值;确定  $\beta$  值时还应考虑建筑物对沉降的要求,当建筑物对沉降要求严时,应取低值。

多层互剪搅拌桩具有整体性好,桩身强度高的特点,桩体与桩间土性状差异较大,因此综合以上规范,对淤泥、淤泥质土和流塑状软土, $\beta$  取 0.1~0.4,对其它土层则按《建筑地基处理技术规范》, $\beta$  取 0.4~0.8;综合褥垫层设计考虑,设置褥垫层且厚度大时取高值;综合地质条件考虑,桩端土未经修正的承载力特征值小于或等于桩周土地基承载力特征值的平均值时,差值大时应取高值。

4.3.2 多层互剪搅拌桩复合地基的沉降计算,可根据现行行业标准《公路路基设计规范》JTG D30 相关规定计算。

4.3.3 多层互剪搅拌桩复合地基的稳定计算,可根据现行行业标准《公路路基设计规范》JTG D30 相关规定计算。

#### 条文说明

多层互剪搅拌桩复合地基稳定性计算推荐采用简化 Bishop 法计算。按照行业标准《公路路基设计规范》JTG D30 的规定,水泥土搅拌桩复合地基上路堤的整体稳定性计算宜采用简化 Bishop 法,复合地基内滑动面上的抗剪强度采用复合体不排水抗剪强度;

## 5. 装备

### 5.1 一般规定

- 5.1.1 多层互剪搅拌桩钻机装备由搅拌系统、辅助系统及数字化测控系统组成。
- 5.1.2 搅拌系统由桩架、动力头、同轴双层钻杆及框架式互剪搅拌钻具组成。
- 5.1.3 辅助系统由自动制浆与供浆系统组成。
- 5.1.4 数字化测控系统应具有数据自动采集与显示、成桩过程自动化控制及监控的功能。
- 5.1.5 多层互剪搅拌桩设备选型可按照附录 A 选用。

### 5.2 搅拌系统与辅助系统

- 5.2.1 动力头应根据施工深度、成桩直径、地质条件等因素选用，并符合下列要求：

- 1 应能合理分配扭矩，同时输出至同轴双层钻杆，使内外钻杆维持工作转速；
- 2 根据动力头功率与驱动力形式，分为 110kW 单电机电动型、110kW 双电机电动型、250kW 液压型以及 264kW 双电机电动型；当施工深度不大于 30m，成桩直径不大于 1000mm 时宜选用 110kw 的动力头；当施工深度大于 30m 或成桩直径大于 1000mm 宜选用 250kW 或 264kW 的动力头。

- 5.2.2 同轴双层钻杆应根据施工深度、成桩直径等因素选用，并符合下列要求：

- 1 内钻杆内应至少能布置 1 条供浆通道，并满足浆液稳定输送需求；
- 2 内钻杆的工作转速宜为 25~50 rpm；外钻杆的工作转速宜为 15~25 rpm；
- 3 应配置移动式钻杆定位导向装置，成桩深度超过 30m 时应配置 2 个。

- 5.2.3 框架式互剪搅拌钻具应根据施工深度、成桩直径、地质条件等因素选用，并符合下列要求：

- 1 外框架及内管上的搅拌翼板应能形成不少于 5 层的相对剪切搅拌作用；
- 2 外框架及内管上的搅拌翼板的尺寸、角度、间距和几何形式宜根据地质条件、桩长及桩径调整。

- 5.2.4 桩架应根据施工深度、施工净空等条件选用，并符合下列要求：

- 1 桩架应配置垂直度检测仪，并具有水平和垂直偏差调整功能。
- 2 桩架施工作业及行进的稳定性应符合现行国家标准《打桩设备安全规范》GB 22361 和《建筑施工机械与设备钻孔设备安全规范》GB 26545 的有关规定。

- 5.2.5 自动制浆与供浆系统应由数字化测控系统进行控制，并符合下列要求：

- 1 配置流量计量与压力测量装置，并具有自动计量浆量的功能；

2 应采用变频注浆泵，注浆泵最大泵送能力不宜小于施工所需最大流量值的 1.25 倍。

### 5.3 数字化测控系统

5.3.1 数字化测控系统应具有下列功能：

- 1 实时检测成桩过程中的垂直度；
- 2 实时定位施工桩位；
- 3 自动采集、显示和传输施工数据；
- 4 控制固化剂浆液流量与成桩速度匹配；
- 5 控制钻具的下沉与提升；
- 6 基于施工数据的监控和报警。

5.3.2 数字化测控系统自动采集和存储施工数据包括成桩垂直度、成桩深度、下沉与提升速度、浆液流量、供浆管压力、内外钻杆转速及电流；并可生成包含以上参数的施工记录表。

5.3.3 浆液流量、供浆管压力、下沉与提升速度、垂直度等参数出现异常时，数字化测控系统应能够自动预警。

5.3.4 多层互剪搅拌桩施工中的浆液流量应采用经国家计量部门认证的监测仪器进行自动记录。

## 6. 施工

### 6.1 一般规定

#### 6.1.1 多层互剪搅拌桩施工前应具备下列资料：

- 1 场地岩土工程勘察报告；
- 2 临近建（构）筑物和市政设施等相关资料；
- 3 测量基线和水准点资料；
- 4 防洪、防汛、防台和环境保护的有关规定；
- 5 工程设计有关文件；
- 6 现场施工条件，包括场地布置要求，临近工程活动等情况；
- 7 施工组织设计或专项施工方案等。

#### 6.1.2 多层互剪搅拌桩施工场地，应符合下列规定：

- 1 施工用水、用电、施工道路应畅通；
- 2 施工场地应平整，地基承载力应满足施工机械的施工要求；
- 3 对涉及施工安全、周边环境安全，以及可能对人身财产安全造成危害的对象或被保护对象设置安全措施及监测措施。

#### 6.1.3 多层互剪搅拌桩施工放样，应符合下列规定：

- 1 应根据设计文件绘制桩位平面布置图；
- 2 应定期复核导线点、水准点，宜采用全站仪或经纬仪进行施工区域轴线和边线的施工放线；
- 3 应对桩位逐点放样，逐一标识。

#### 6.1.4 正式施工前应进行试成桩，通过试成桩确定施工参数；试成桩应根据设计要求、工程特点、地质条件和周边环境等选择有代表性地层的区域进行，数量应不少于 3 根，并符合下列规定：

- 1 应确定多层互剪搅拌桩工艺的适应性及施工参数；
- 2 应确定固化剂掺入比、水灰比和外加剂；
- 3 应评价成桩质量和搅拌均匀性；
- 4 应检验桩身芯样无侧限抗压强度；
- 5 应检验单桩承载力和复合地基承载力。

#### 6.1.5 多层互剪搅拌桩试成桩前，应对数字化测控系统的传感器等按照仪器说明书进行校准

或标定，并做测试记录。

6.1.6 在试成桩过程中，应确定的施工参数主要包括下沉与提升速度，内外钻杆转速以及相对应的喷浆压力和浆液流量等；并检验按设计固化剂掺入比，水灰比配置浆液的施工性能。

#### 条文说明

多层互剪搅拌桩的成桩施工，由数字化测控系统根据试成桩确定的施工参数进行控制实现自动化成桩。为保证桩身完整连续，搅拌均匀，在试成桩过程中，施工参数的初始设定及调整宜根据岩土工程勘察报告、相似工程经验、施工机械的性能，结合实际施工中电流的大小综合确定。原则上，施工参数调整前后应确保搅拌次数和浆液流量的匹配一致性，并确保施工的连续性。

例如，施工遇硬土层时，宜根据试成桩结果提前降低转速，降低幅值应根据电流大小和钻机功率综合确定；调整后降低转速的同时，可考虑降低下沉速度或在提升复搅阶段适当降低提升速度，以此增加搅拌时间和次数，确保桩身施工质量。

6.1.7 多层互剪搅拌桩施工流程，如图 6.1 所示。

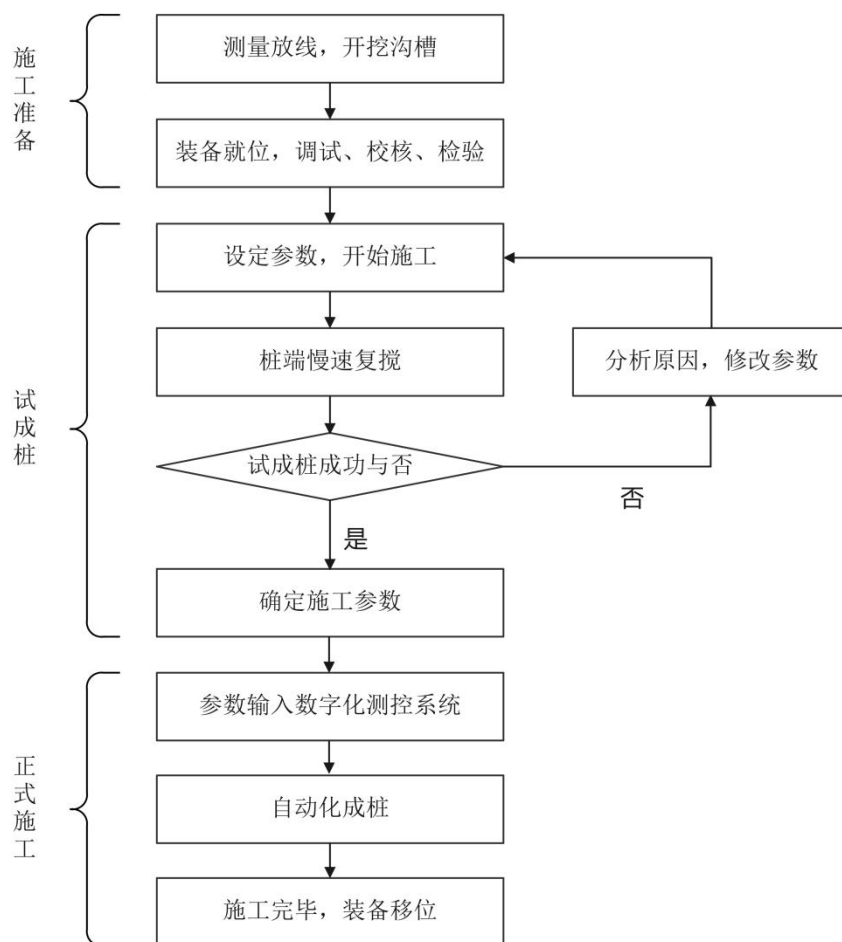


图 6.1 多层互剪搅拌桩施工流程示意图

## 6.2 施工方法

6.2.1 多层互剪搅拌桩成桩施工前应应对桩架底盘水平度、桩架及钻杆的垂直度进行校核，桩架的垂直度偏差应小于 1%。

6.2.2 多层互剪搅拌桩开机前应调试，确保桩机、制浆后台、注浆泵及输浆管等的正常运转。

### 条文说明

施工装备组装完成后，应进行通清水测试，一是清洗管路，二是检查、检测施工装备系统是否正常运转。施工前检查搅拌叶片的长度及搅拌机械的工作性能。

搅拌头的直径应定期复核检查，其磨耗量不得大于 10mm。

6.2.3 成桩施工前，通过数字化测控系统设置施工参数，对制浆与供浆、搅拌等工序进行自动化控制调试。

6.2.4 多层互剪搅拌桩，成桩过程采用“两搅一喷、下搅喷浆”施工工艺，并基于数字化测控系统进行自动化施工和全过程质量管控，并应符合下列规定：

- 1 多层互剪搅拌桩机就位，钻具与桩位对中，定位偏差不宜大于 50mm；
- 2 启动搅拌桩机，喷浆搅拌下沉：开始泵送固化剂浆液，动力头驱动框架式搅拌钻具进行正反向旋转剪切对搅，按设定速度持续下沉至设计标高；
- 3 喷浆搅拌下沉至设计标高后，停止泵送固化剂浆液，宜对桩端以上 1.5m 范围复搅一次，复搅提升阶段动力头应驱动钻具内、外钻杆逆向旋转；
- 4 复搅完成后，动力头驱动钻具内、外钻杆逆向旋转，搅拌提升至设计桩顶标高；
- 5 完成单桩施工，保存该桩施工记录；并对供浆管路及钻具进行清洗。

### 条文说明

多层互剪搅拌桩采用两搅一喷、下搅喷浆工艺。为论证多层互剪搅拌桩两搅一喷工艺的有效性，在三门某工程试验场地进行了多层互剪搅桩和传统搅拌桩的对比试验，并进行了现场 7d 龄期的取芯与 28d 龄期的静载荷试验。场地软土主要是冲海积流塑态淤泥。试验桩桩间距大于 6m，桩径为 700mm，桩长为 18m。水泥掺入量为 15%，水灰比为 0.55。多层互剪搅拌桩采用两搅一喷工艺，传统搅拌桩采用四搅两喷工艺。



图 6.2 多层互剪搅拌桩 7d 龄期芯样照片

下图为 15% 水泥掺入比下，两种施工工艺的桩身强度随桩长变化曲线。传统搅拌桩（DDM）的桩身平均强度为 0.30MPa，多层互剪搅拌桩的桩身平均强度为 0.94MPa。

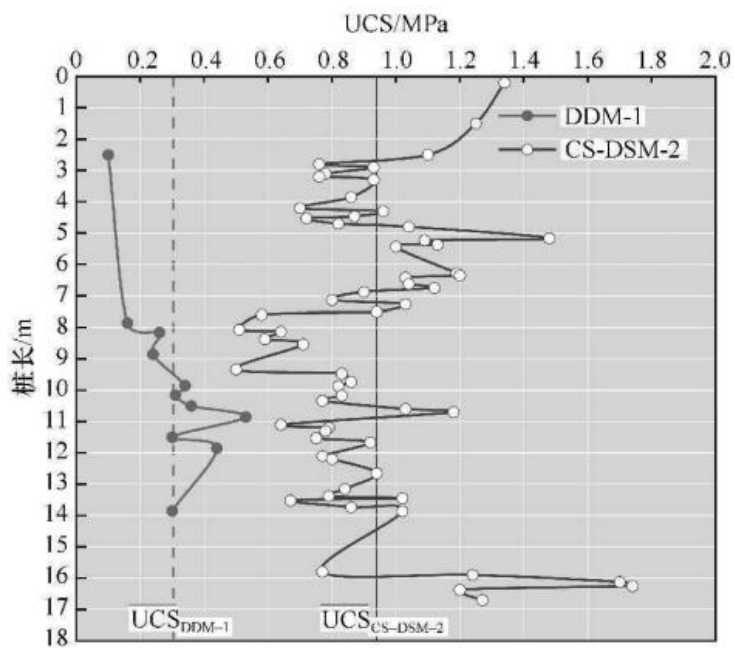


图 6.3 桩身强度随桩长变化图

（DDM—传统搅拌桩，CS-DSM—多层互剪搅拌桩）

实测传统搅拌桩和多层互剪搅拌桩单桩极限承载力分别为 405kN 和 500kN，在相同水泥材料用量下，实测单桩极限承载力提高了 23.5%。以上对比结果均表明多层互剪搅拌桩两搅一喷工艺对比传统搅拌桩四搅两喷工艺，其搅拌的均匀性及完整性更为有效。

多层互剪搅拌桩技术在浙江湖州、舟山等地高速公路项目，浙江温州工业项目，广东南沙轨道项目等工程的成功应用，验证了其在复杂地质条件和场地情况条件下具有广泛的适应性，并且证明两搅一喷工艺能有效保证全桩完整性和桩身均匀性。

在试成桩参数确定的情况下，应采用数字化测控系统自动控制。当数字化测控系统出现异常情况进行报警时宜进行人工辅助处理，待异常情况解除后方可继续进行自动化成桩施工；遇到地层突变、卷扬电流过大、进尺缓慢等情况，经监理同意后，可采用半自动或者手动操作模式，成桩施工完成后，查询施工记录表，分析原因以指导后续施工。

工程实践证明，搅拌桩的搅拌均匀性是控制成桩质量的核心因素，而单位桩长搅拌次数  $T$  是评价搅拌桩均匀性的关键指标；日本与美国搅拌桩施工的常用  $T$  值为 350~450。依据多层互剪搅拌桩工艺研发阶段的室内模型试验数据，发现在固化剂掺入比恒定条件下，多层互剪搅拌桩的桩身均匀性和平均强度与搅拌次数  $T$  正相关。

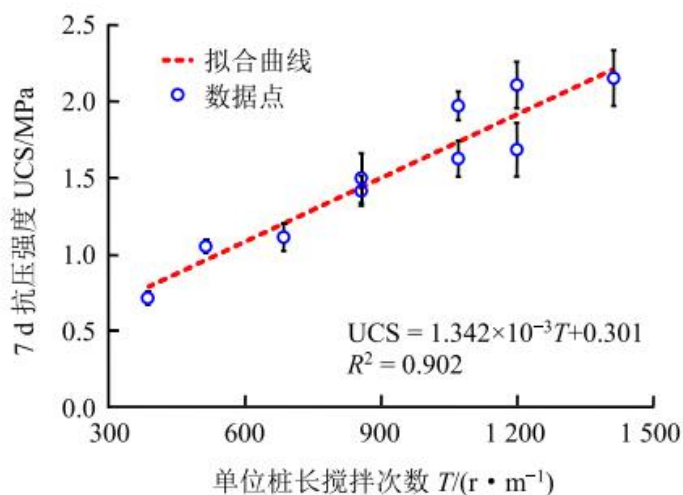


图 6.4 7d 桩身强度与搅拌次数的相关关系

为此，提出了基于两搅一喷、下钻喷浆工艺的  $T$  值计算公式。

$$T = M_1 \left( \frac{N_1}{v_1} + \frac{N_2}{v_2} \right) + M_2 \left( \frac{N_3}{v_1} + \frac{N_4}{v_2} \right)$$

$M_1$  为内杆搅拌翼板个数； $M_2$  为外杆搅拌翼板个数； $v_1$  为钻具下沉速度（m/min）； $v_2$  为钻具提升速度（m/min）； $N_1$  为下沉阶段内杆转速(rpm)； $N_2$  为提升阶段内杆转速(rpm)； $N_3$  为下沉阶段外杆转速(rpm)； $N_4$  为提升阶段外杆转速(rpm)。

室内模型试验及现场足尺实验结果结合施工效率考虑，建议每延米桩长的搅拌次数  $T$  不小于 500 次。钻具下沉速度不宜大于 1.2m/min，提升速度不宜大于 2.0m/min；

内、外杆转速可分别按 50r/min 和 25r/min 暂定；内、外杆转速比宜根据土质情况及现

场测试结果综合确定并进行优化调整。

### 6.3 施工过程管理

6.3.1 多层互剪搅拌桩施工过程中，由数字化测控系统对各项施工数据实时采集并记录的同时，应保持施工记录，可按本规程附录 B 执行。

6.3.2 多层互剪搅拌桩的质量控制应贯穿施工的全过程。施工过程中必须随时检查施工记录和计量记录，并对每根桩进行质量评定。

6.3.3 每台班成桩施工后，应对数字化测控系统记录的数据进行核查，发现问题及时分析解决，方可进行后续施工。

6.3.4 施工过程中，要求桩身完整，搅拌均匀，几何尺寸准确。每根桩应一次性连续完成，不得中断、一旦断浆，必须补浆复搅，且与断浆处搭接长度不少于 50cm，保证成桩的连续性。

6.3.5 多层互剪搅拌桩，如有搭接设计，相邻桩的搭接时间间隔不宜大于 24h。

6.3.6 搅拌桩施工完毕，在其强度达到设计要求之前，应采取保护措施，禁止大型机械设备在周围活动。

7. 质量控制

7.1 一般规定

- 7.1.1 多层互剪搅拌桩的质量控制应包括施工前检验、施工中检验和施工后检验。
- 7.1.2 多层互剪搅拌桩的检验可依据数字化测控系统生成的施工记录表进行检查；数字化测控系统中不包含的项目，应采用其他方法检查。

7.2 施工检验

7.2.1 多层互剪搅拌桩的施工前检验应符合以下规定：

- 1 固化剂、外加剂等原材料进场时，应具有产品标签、生产厂家、产品批号、生产日期等；应按批次对原材料进行抽样检验，送检质量报告应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》 GB 175 和《混凝土外加剂》 GB 8076 的规定。
- 2 施工用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》 JGJ 63 的有关规定。
- 3 应对多层互剪搅拌桩机装备进行进场检查和进行试运行试验、对设备配置的仪表进行校准，并应符合现行国家标准《机械设备安装工程施工及验收通用规范》 GB 50231 的有关规定。

7.2.2 多层互剪搅拌桩的施工中检验应符合以下规定：

- 1 浆液水灰比、固化剂掺入比应符合设计和施工工艺要求。自动制浆系统准确计量固化剂用量及用水量精确控制水灰比；水灰比应采用比重计抽检，每台班不少于 2 次；浆液不得离析；
- 2 数字化测控系统应控制内外钻杆转速与下沉速度自动实时匹配；要求沿桩身全长每延米搅拌次数均不小于 500 次；
- 3 施工中应通过数字化测控系统检查施工记录和计量记录，桩长、垂直度、下沉和提升速度、内外钻杆转速、浆液流量等施工技术参数应符合设计及试成桩确定的参数要求。
- 4 施工中质量检验标准应符合表 7.2.2 的规定。

表 7.2.2 多层互剪搅拌桩施工中质量检验要求

| 序号 | 检查项目 | 容许偏差   | 检查数量   | 检查方法            |
|----|------|--------|--------|-----------------|
| 1  | 桩长   | 不小于设计值 | 每根     | 检查数字化测控系统记录     |
| 2  | 垂直度  | 不大于设计值 | 每根     | 检查数字化测控系统记录     |
| 3  | 浆液流量 | 不小于设定值 | 每根     | 检查数字化测控系统记录     |
| 4  | 浆液压力 | 不小于设定值 | 每根     | 检查数字化测控系统记录     |
| 5  | 水灰比  | 不大于设定值 | 2 次/台班 | 检查自动制浆系统配合比重计抽检 |

|   |         |        |    |                    |
|---|---------|--------|----|--------------------|
| 6 | 固化剂用量   | 不小于设计值 | 每根 | 检查自动制浆系统和数字化测控系统记录 |
| 7 | 下沉、提升速度 | 不大于设定值 | 每根 | 检查数字化测控系统记录        |
| 8 | 内外钻杆转速  | 不小于设定值 | 每根 | 检查数字化测控系统记录        |

### 7.2.3 多层互剪搅拌桩的施工后检验应符合以下规定：

- 1 多层互剪搅拌桩成桩 7d 后可采用浅部开挖检查桩体成形情况、搅拌均匀程度和桩身直径。检查数量应符合设计要求；
- 2 多层互剪搅拌桩成桩 28d 后钻孔取芯，应采用合适设备保证取芯质量，钻孔取芯直径不应小于 90mm；并应取代表性芯样进行室内无侧限抗压强度试验。检验数量应符合设计要求；
- 3 多层互剪搅拌桩的承载力检验可采用静载荷试验，宜在成桩 28d 后进行；检验数量应符合设计要求；
- 4 多层互剪搅拌桩复合地基的质量检验尚应符合《公路路基施工技术规范》 JTG/T 3610 等相关规范的规定。
- 5 检验标准应符合表 7.2.3 的规定。

表 7.2.3 多层互剪搅拌桩施工后质量检验要求

| 序号 | 检查项目 | 容许偏差        | 检查数量   | 检查方法        |
|----|------|-------------|--------|-------------|
| 1  | 桩径   | 不小于设计值      | 符合设计要求 | 钢卷尺量测       |
| 2  | 桩长   |             | 每根     | 检查数字化测控系统记录 |
| 3  | 桩身强度 |             | 符合设计要求 | 取芯强度试验      |
| 4  | 承载力  |             | 符合设计要求 | 静载荷试验       |
| 5  | 桩位   | ±50mm       | 每根     | 检查数字化测控系统记录 |
| 6  | 桩顶标高 | -50mm~+30mm | 每根     | 水准测量        |

### 条文说明

1 本款属于施工单位自检范围。施工单位在分析数字化测控系统的质量统计的基础上，进行开挖检验桩头顶部。检验频率应根据设计要求，对于公路、铁路等线长量大工程，检验频率可为总桩数的 2%，且不少于 3 根。检验记录可按照附录 C 执行。

2 大量工程实践表明，采用钻孔取芯方法是检验搅拌桩搅拌均匀性评价其桩身强度的最直观有效的方法。但取芯工艺对取芯质量有较大影响，对变形有严格要求的工程宜采用双管单动取样器进行取芯，并选取代表性芯样进行室内无侧限抗压强度试验确定其强度  $q_u$ ；关于钻孔直径，国家标准《复合地基技术规范》GB/T50783-2012 中要求不宜小于 108mm，根

据近年来的取芯实践，采用 91mm 的钻孔直径能更好地保证取芯质量，因此推荐最小取芯直径为 91mm。关于检验桩的成桩龄期一般应达到 28d，在工期要求特殊的情况下，进行不同龄期的桩身质量检测，其强度可以根据相关经验公式换算到 28d 龄期的强度。

相关规范对检验数量进行了规定可以参考：如《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02 及《复合地基技术规范》GB/T50783-2012 推荐检验频率为总桩数的 1%~2%，行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-2012 推荐对变形有严格要求的工程，检验频率 0.5%。且不少于 6 根；对于公路、铁路等线长量大工程，检验频率可为总桩数的 2%~5%，且不少于 3 根。钻孔取芯和试验方法按照附录 D。

4 复合地基承载力的检验主要采用单桩或多桩复合地基静载荷试验。检测分两个阶段，第一阶段为正式施工前的试验工程，目的是为检验优化设计提供依据，试验数量单项工程不少于 3 根；第二阶段为施工完成后验收检验，检验数量符合设计要求，国家现行标准《复合地基技术规范》GB/T 50783 推荐检验频率为总桩数的 0.5%~1%、《建筑地基处理技术规范》JGJ79 推荐检验频率为总桩数的 1%；对于公路、铁路等线长量大工程，检验频率可为总桩数的 1%~5%，且不小于 3 根。复合地基承载力检验方法按照附录 E。

## 附录 A

(规范性)

A.0.1 多层互剪搅拌桩机设备应由桩架、动力头、同轴双层钻杆、框架式互剪搅拌钻具以及后台制浆与供浆系统等组成 (图 A.0.1-1)。

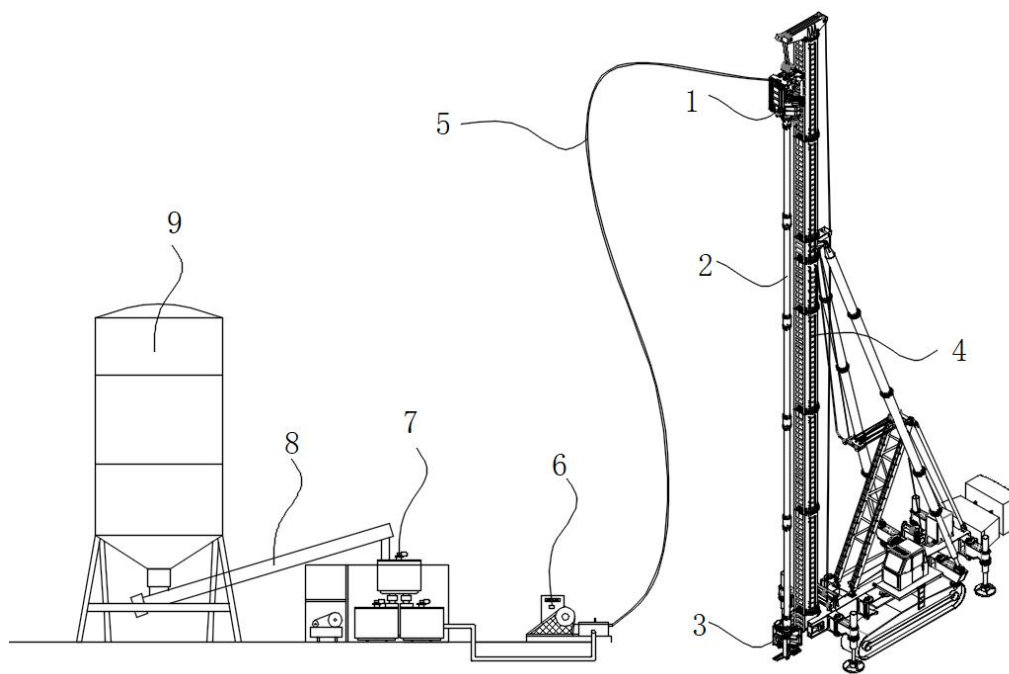


图 A.0.1-1 多层互剪搅拌桩机示意图

1——动力头；2——同轴双层钻杆；3——框架式互剪搅拌钻具；4——桩架；

5——供浆管；6——输浆泵；7——自动制浆后台；8——螺旋上料机；9——储料罐；

A.0.2 多层互剪搅拌桩机设备性能宜符合表 A.0.2-1 的规定。

表 A.0.2-1 多层互剪搅拌桩机设备性能

| 型号         | 电动机功率 (kW) | 最大成桩深度 (m) | 成桩直径 (mm) |
|------------|------------|------------|-----------|
| SXJ-110-D2 | 2×55       | 21         | 700~1000  |
| SXJ-110-D1 | 110        | 30         | 700~1000  |
| SXJ-250Y   | 250        | 42         | 1000~2000 |
| SXJ-264-D2 | 2×132      | 50         | 1000~2000 |

附 录 B  
(规范性)

多层互剪搅拌桩自动监控施工记录表  
表 B 多层互剪搅拌桩自动监控施工记录表

工程名称:

施工单位:

监理单位:

桩机编号:

机械类型:

设计桩长:

桩径:

设计桩距:

水灰比:

施工日期:

| 施工段落 | 桩号 | 成桩时间 |      | 施工<br>桩长<br>(m) | 下钻速度<br>(m/min) | 提钻速度<br>(m/min) | 总喷浆量<br>(L) | 总灰量<br>(kg) | 喷浆<br>时间<br>(s) | 最大<br>内钻杆电流<br>(A) | 内钻杆<br>速度<br>(r/min) | 最大<br>外钻杆电流<br>(A) | 内钻杆<br>速度<br>(r/min) | 垂直度<br>(%) | 桩机<br>编号 |
|------|----|------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|-----------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------|----------|
|      |    | 开始时间 | 结束时间 |                 |                 |                 |             |             |                 |                    |                      |                    |                      |            |          |
|      |    |      |      |                 |                 |                 |             |             |                 |                    |                      |                    |                      |            |          |
|      |    |      |      |                 |                 |                 |             |             |                 |                    |                      |                    |                      |            |          |
|      |    |      |      |                 |                 |                 |             |             |                 |                    |                      |                    |                      |            |          |
|      |    |      |      |                 |                 |                 |             |             |                 |                    |                      |                    |                      |            |          |
|      |    |      |      |                 |                 |                 |             |             |                 |                    |                      |                    |                      |            |          |
|      |    |      |      |                 |                 |                 |             |             |                 |                    |                      |                    |                      |            |          |
|      |    |      |      |                 |                 |                 |             |             |                 |                    |                      |                    |                      |            |          |
|      |    |      |      |                 |                 |                 |             |             |                 |                    |                      |                    |                      |            |          |

施工技术员:

监理工程师:

日期:

附 录 C

(规范性)

多层互剪搅拌桩现场开挖检验记录表

表 C 多层互剪搅拌桩现场开挖检验记录表

工程名称：

施工单位：

| 序号 | 桩<br>编号 | 施工<br>日期 | 开挖<br>日期 | 成桩<br>龄期<br>(d) | 开挖<br>深度<br>(m) | 实测<br>桩径<br>(mm) | 实测<br>桩距<br>(mm) | 桩体<br>成型 | 搅拌<br>均匀<br>性 | 备注 |
|----|---------|----------|----------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|----------|---------------|----|
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |
|    |         |          |          |                 |                 |                  |                  |          |               |    |

检查人：

记录人：

监理工程师：

附 录 D

(规范性)

多层互剪搅拌桩钻孔取芯检验方法

- D.0.1 钻孔取芯检验应在搅拌桩成桩 28d 后进行。
- D.0.2 取芯检验孔位应布置在搅拌桩桩顶偏离中心 10mm 左右位置；宜采用双管单动取样器进行连续取芯，取代表性芯样进行无侧限抗压强度试验。
- D.0.3 固化土抗压强度试验应符合现行国家标准《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266 的有关规定。
- D.0.4 现场应对固化土芯样进行观察描述，观察描述内容应包括搅拌均匀性和状态、成桩连续性、及桩底端承土性等；固化土搅拌均匀性可按表 D.0.4-1 进行评价，固化土芯样状态可按表 D.0.4-2 进行评价。

表 D.0.4-1 现场水泥土芯样均匀性评价表

| 搅拌均匀性评价 | 现场取芯情况描述                      |
|---------|-------------------------------|
| 搅拌均匀    | 固化土搅拌纹理清晰，无水泥粒块               |
| 搅拌基本均匀  | 固化土搅拌纹理不连续，含水泥粒块但颗粒直径≤2cm     |
| 搅拌不均匀   | 固化土无搅拌纹理，夹固化块或较多富集块，且颗粒直径>2cm |

表 D.0.4-2 水泥土芯样状态现场评价

| 状态评价 | 软塑       | 可塑            | 硬塑           | 稍硬          | 坚硬         |
|------|----------|---------------|--------------|-------------|------------|
| 现场描述 | 手捏很软，易变形 | 手按有指印，但手捏不易变形 | 手按无指印且手能掰裂成块 | 手捏较硬，用小刀能划刻 | 干而坚硬，很难掰成块 |

- D.0.5 搅拌桩取芯率  $P_q$  应根据现场取芯样，用直尺量取其不小于 70mm 芯样长度，并按按下式计算取芯率：

$$P_q = \frac{\sum l_i}{L} \times 100\% \tag{D.0.5}$$

- 式中： $P_q$  —— 搅拌桩桩体取芯率(%)；
- $L$  —— 回次进尺(m)；
- $l_i$  —— 该回次进尺中，长度大于或等于 70mm 芯样段的长度(m)。

- D.0.6 搅拌桩桩身质量应通过现场描述、取芯率和无侧限抗压强度指标等进行综合评价。

## 附 录 E

(规范性)

### 多层互剪搅拌桩静载荷试验方法

E.0.1 本试验方法适用于单桩竖向抗压载荷试验、单复合地基竖向抗压载荷试验和多桩复合地基竖向抗压载荷试验。

E.0.2 进行竖向抗压载荷试验前,应采用合适的检测方法对复合地基桩施工质量进行检验,必要时应对桩间土进行检验,应根据检验结果确定竖向抗压载荷试验点。

E.0.3 单桩竖向抗压载荷试验承压板面积应等于受检桩截面积,复合地基平板载荷试验的承压板面积应等于受检桩所承担的处理面积,桩的中心或多桩的形心应与承压板形心保持一致,且形状宜与受检桩布桩形式匹配。承压板可采用钢板或混凝土板,其结构和刚度应保证最大荷载下承压板不翘曲和不开裂。

E.0.4 试坑底宽不应小于承压板宽度或直径的 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承压板宽度或直径,并不应小于 2m。竖向桩顶面标高应与设计标高相适应,应采取避免地基土扰动和含水量变化的措施。在地下水位以下进行试验时,应事先将水位降至试验标高以下,安装设备,并应待水位恢复后再进行加荷试验。

E.0.5 找平桩的中粗砂厚度不宜大于 20mm。复合地基平板载荷试验应在承压板下设 50mm~150mm 的中粗砂垫层。有条件时,复合地基平板载荷试验垫层厚度、材料宜与设计相同,垫层应在整个试坑内铺设并夯压至设计夯实度。

E.0.6 当采用 1 台以上千斤顶加载时,千斤顶规格、型号应相同,合力应与承压板中心在同一铅垂线上,且应并联同步工作。加载时最大工作压力不应大于油泵、压力表及油管额定工作压力的 80%。荷载量测宜采用荷载传感器直接测定,传感器的测量误差为±1%,应采用自动稳压装置,每级荷载在维持过程中变化幅度应小于该级荷载增量的 10%,应在承压板两个方向对称安装 4 个位移量测仪表。

E.0.7 最大试验荷载不应小于设计承载力特征值的 2 倍。加载分级可分为 8~12 级。正式试验前宜按最大试验荷载的 5%预压,垫层较厚时宜增大预压荷载,并应卸载调零后再正式试验。

E.0.8 每级加载后,应按间隔 10、10、10、15、15min,以后每级 30min 测读一次沉降,当连续 2h 的沉降速率不大于 0.1mm/h 时,可加下一级荷载。

处理软黏土地基的多桩复合地基竖向抗压载荷试验,可根据经验适当放大相对稳定标准。

E.0.9 单桩竖向抗压载荷试验出现下列情况之一时,可终止试验:

- 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 在某级荷载下的沉降量大于前级沉降量的 2 倍,并经 24h 沉降速率未能达到相对稳定标准;
- 3 桩身破坏,桩顶变形急剧增大;
- 4 当桩长超过 25m, Q-s 曲线呈缓变形时,顶总沉降量大于 60mm~80mm;
- 5 总加载量已经达到预定的最大试验荷载。
- 6 为设计提供依据的试验桩,应加载至破坏。

E.0.10 复合地基竖向抗压载荷试验出现以下情况之一时,可终止试验:

- 1 沉降急剧增大,承压板周围隆起或产生破坏性裂缝。
- 2 在某级荷载下的沉降量大于前级沉降量的 2 倍,并经 24h 沉降速率未能达到相对稳定标准。
- 3 在某荷载下的沉降量大于前级沉降量的 5 倍, p-s 曲线出现陡降段,且总沉降量不小于承压板边长(直径)的 4%。
- 4 相对沉降大于或等于 0.10。
- 5 总加载量已经达到预定的最大试验荷载。

E.0.11 卸载级数可为加载级数的 1/2,应等量进行,每卸一级,应间隔 30min,读记回弹量,待卸完全部荷载后应间隔 3h 读记总回弹量。

E.0.12 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(Qs)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 当出现本规范第 E.0.9 条第 2 款的情况时,取前一级荷载值;
- 4 Q-s 曲线呈缓变型时,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 参加统计的试桩,当满足其极差不超过平均值的 30%时,设计可取其平均值为单桩极限承载力;极差超过平均值的 30%时,应分析离差过大的原因,结合工程具体情况确定单桩极限承载力;需要时应增加试桩数量。

E.0.13 将单桩极限承载力除以安全系数 2,为单桩承载力特征值。

E.0.14 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，可取  $s/d$  或  $s/b$  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。

3 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；

4 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。

E.0.15 一个检验批参加统计的试验点不应少于 3 点，承载力极差不超过平均值的 30% 时，可取其平均值作为承载力特征值。当极差超过平均值的 30% 时，应分析原因，并结合工程具体情况综合确定，必要时可增加试验点数量。