

中华人民共和国行业标准

水下深层水泥搅拌桩法 施工质量控制与检验标准

JTS/T 325—2024

主编单位：中交第四航务工程局有限公司

批准部门：中华人民共和国交通运输部

施行日期：2024年4月1日

人民交通出版社股份有限公司

2024·北京

交通运输部关于发布 《水下深层水泥搅拌桩法 施工质量控制与检验标准》的公告

2024 年第 3 号

现发布《水下深层水泥搅拌桩法施工质量控制与检验标准》(以下简称《标准》)。
《标准》为水运工程建设推荐性行业标准,标准代码为 JTS/T 325—2024,自 2024 年 4 月 1
日起施行。

《标准》由交通运输部水运局负责管理和解释,实施过程中具体使用问题的咨询,由
主编单位中交第四航务工程局有限公司答复。《标准》文本可在交通运输部政府网站水
路运输建设综合管理信息系统“水运工程行业标准”专栏([mwtis. mot. gov. cn/syportal/
sybz](http://mwtis.mot.gov.cn/syportal/sybz))查询和下载。

特此公告。

中华人民共和国交通运输部

2024 年 1 月 12 日

制定说明

本标准是根据 2020 年度水运工程标准编制计划要求,由交通运输部水运局组织有关单位,在深入调查研究的基础上,总结我国近年来水下深层水泥搅拌桩法地基加固施工的实践经验,吸纳成熟的新工艺和新装备,广泛征求有关单位和专家的意见编制而成。

近年来,我国在水下深层水泥搅拌桩法地基加固核心技术与装备方面取得了突破,在多个重大建设工程中得到成功应用,积累了丰富的实践经验。为适应水运工程高质量发展要求,统一水下深层水泥搅拌桩法地基加固施工质量控制与检验技术,交通运输部水运局组织开展了《水下深层水泥搅拌桩法施工质量控制与检验标准》的制定工作。

本标准共分 6 章 4 个附录,主要包括配合比设计与现场工艺试验、施工过程质量控制、质量检验等技术内容,并附条文说明。

本标准主编单位为中交第四航务工程局有限公司,参编单位为中交四航工程研究院有限公司、中交四航局第二工程有限公司、广州港湾工程质量检测有限公司、中交天津港湾工程研究院有限公司、中交第四航务工程勘察设计院有限公司。编写人员分工如下:

- 1 总则:吕卫清
 - 2 术语:吕卫清 陈平山 苏林王
 - 3 基本规定:吕卫清 陈平山 谭德银
 - 4 配合比设计与现场工艺试验:陈平山 刘志军 汤明
 - 5 施工过程质量控制:李汉渤 张克浩 滕超 肖阳春 何丽平
 - 6 质量检验:陈平山 滕超 王新 林佑高 喻志发 寇晓强 何洪涛
- 附录 A:刘志军 滕超
附录 B:张克浩 王新
附录 C:陈平山 林佑高
附录 D:滕超

本标准于 2023 年 1 月 12 日通过部审,2024 年 1 月 12 日发布,自 2024 年 4 月 1 日起施行。

本标准由交通运输部水运局负责管理和解释。各单位在执行过程中发现的问题和意见,请及时函告交通运输部水运局(地址:北京市建国门内大街 11 号,交通运输部水运局技术管理处,邮政编码:100736)和本标准管理组(地址:广东省广州市海珠区沥滘路 368 号,中交第四航务工程局有限公司,邮政编码:510290,电话:020-28126490),以便修订时参考。

目 次

1 总则	(1)
2 术语	(2)
3 基本规定	(3)
4 配合比设计与现场工艺试验	(4)
4.1 一般规定	(4)
4.2 水泥石配合比设计	(4)
4.3 现场工艺试验	(5)
5 施工过程质量控制	(6)
5.1 一般规定	(6)
5.2 施工装备	(6)
5.3 材料	(7)
5.4 施工工艺	(7)
5.5 计量仪器精度与校验	(9)
6 质量检验	(10)
6.1 一般规定	(10)
6.2 检测项目	(10)
6.3 检测方法	(11)
6.4 质量评价	(13)
附录 A 水泥石用料及用水计算方法	(15)
附录 B 切割搅拌次数、每米喷浆量及喷浆流量计算方法	(17)
附录 C 皮尔逊相关系数计算方法	(18)
附录 D 本标准用词说明	(19)
引用标准名录	(20)
附加说明 本标准主编单位、参编单位、主要起草人、主要审查人、总校人员 和管理组人员名单	(21)
条文说明	(23)

1 总 则

1.0.1 为统一水下深层水泥搅拌桩法地基加固施工质量控制与检验技术要求,控制工程质量,做到技术先进、安全可靠、经济合理,制定本标准。

1.0.2 本标准适用于水下深层水泥搅拌桩法地基加固的施工质量控制与检验。

1.0.3 水下深层水泥搅拌桩法地基加固施工质量控制与检验除应符合本标准规定外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 水下深层水泥搅拌桩法 Underwater Deep Cement Mixing Method

采用适用于水上作业的深层搅拌施工装备,将预先制备好的水泥浆液等固化材料注入水下地层,并与土体强制搅拌形成水泥土拌合体,经过水泥的水解与水化反应以及水化物与土颗粒之间的物理化学反应,水泥土强度增长,进而使水泥土拌合体得以硬化的一种地基加固方法。

2.0.2 深层水泥搅拌桩簇 Deep Cement Mixing Cluster

采用深层搅拌施工装备对地基土一次加固形成的多个柱体相互搭接的水泥土拌合体。

2.0.3 一体化深层搅拌施工装备 Integrated Construction Equipment for Deep Cement Mixing

集水泥存储、浆液拌制与泵送、土体深层搅拌等功能于一体,并配置施工控制系统的深层搅拌施工装备,通常指适用于水上作业的一体化专业施工船舶。

2.0.4 深层水泥搅拌机具 Deep Cement Mixing Rig

通过下贯、提升与喷浆搅拌进而形成水泥土桩或桩簇的搅拌设备,包括动力系统、搅拌轴、搅拌头、固定搅拌轴间距的装置等。

2.0.5 水泥掺量 Cement Mixing Mass

单位体积被加固土掺入的水泥质量,单位为 kg/m^3 。

2.0.6 水泥掺入比 Cement Mixing Ratio

掺入的水泥质量与被加固土质量之比,以百分数表示。

2.0.7 水泥土总含水率 Total Water Content of Cement Mixed Soil

单位体积水泥土中水总质量与被加固土干土质量的比值,以百分数表示;水泥土中水总质量包括土体天然含水量、水泥浆中含水量和下贯过程中喷水量。

2.0.8 搅拌路径曲线 Mixing Path Curve

以时间为横轴,搅拌头喷浆口竖向位置为纵轴,用于指导施工和实时记录的施工全过程搅拌头喷浆口随时间在深度方向上运动轨迹的时程曲线,包含搅拌轴下贯速度、提升速度、转速、喷浆流量等关键施工工艺参数。

2.0.9 切割搅拌次数 Blade Rotation Number (BRN)

首次喷浆及后续搅拌施工过程中,沿深度方向每米土体受深层水泥搅拌机具搅拌叶片切割搅拌的总次数。

3 基本规定

3.0.1 水下深层水泥搅拌桩法地基加固施工前,应根据周边环境、地质条件和设计要求编制施工质量控制与检验专项策划方案,内容应包括室内水泥土配合比试验、现场工艺试验、施工工艺、质量检验等及相应的质量控制要点。

3.0.2 水下深层水泥搅拌桩法应用流程应按专项策划、现场调查、室内配合比试验、现场工艺试验、工程施工、质量检验执行。

3.0.3 水下深层水泥搅拌桩法用于处理泥炭土、有机质土、塑性指数大于 25 的黏土、pH 值小于 4 的酸性土、污染土等特殊土时,应通过室内试验和现场工艺试验确定其适用性及采取的措施。

3.0.4 水下深层水泥搅拌桩法施工装备应具备可连续作业的功能,宜采用一体化深层搅拌施工装备进行施工。

3.0.5 水下深层水泥搅拌桩法施工前应根据装备稳性和作业要求确定合理的施工窗口期。

4 配合比设计与现场工艺试验

4.1 一般规定

4.1.1 水泥土配合比设计前,应完成下列工作:

- (1) 收集岩土工程勘察资料;
- (2) 收集类似地质条件下配合比试验及相关工程资料;
- (3) 选取代表性土样,确定配合比试验所需的材料,并检验其性能指标;
- (4) 分析土质特性,明确影响水泥土强度的主要因素。

4.1.2 水泥土配合比设计应确定下列内容:

- (1) 水泥品种和强度等级;
- (2) 水泥掺量或水泥掺入比、水灰比;
- (3) 外加剂种类及用量。

4.1.3 室内水泥土配合比应进行 7d、28d 龄期的试验。有地区经验、水泥土强度增长规律明确时,可用 28d 龄期强度换算为 90d 龄期强度;地区经验不足、水泥土强度增长规律不明确时,还应至少增加 90d 龄期的试验。

4.1.4 室内试验确定的水泥土配合比应经现场工艺试验验证。

4.1.5 现场工艺试验应对 28d 龄期的桩体进行质量检验,必要时增加 90d 龄期的桩体质量检验。

4.1.6 现场工艺试验宜在工程场区内有代表性的区域进行,勘察资料不足时应在试验区域内补充地质勘察。

4.2 水泥土配合比设计

4.2.1 水泥材料宜选用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥或矿渣水泥。

4.2.2 有机质含量较高的腐殖土、淤泥等特殊土,可掺入一定量的石膏、矿渣粉、粉煤灰等材料,掺入比例应通过室内水泥土配合比试验确定,并经现场工艺试验验证。

4.2.3 采用水泥掺量指标进行水泥土配合比设计室内试验时,水泥掺量应根据当地经验、工程要求以及水泥土性能指标等确定,基准值宜采用设计建议值,设计未明确时可取 $200\text{kg}/\text{m}^3 \sim 300\text{kg}/\text{m}^3$ 。

4.2.4 室内水泥土配合比试验应采用不少于 3 种配合比。采用水泥掺入比指标时,应以一种水泥掺入比为基准值,其他水泥掺入比宜与基准值相差 1% 的整数倍;采用水泥掺量指标时,应以一种水泥掺量为基准值,其他水泥掺量宜与基准值相差 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 的整数倍。

4.2.5 水灰比应根据设计要求或当地经验,并综合考虑喷浆设备和输浆管路性能、气温、

土质等条件确定,可取0.6~1.0。

4.2.6 黏土宜增加水泥土总含水率为土体液限值的配合比试验。

4.2.7 采用水泥掺量指标进行室内水泥土配合比设计时,水泥土用料及用水应按附录A计算确定。

4.2.8 室内水泥土配合比设计试验方法及测试结果分析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。

4.3 现场工艺试验

4.3.1 现场工艺试验应包括下列内容:

- (1) 验证施工装备性能及其适用性;
- (2) 建立持力层判定标准;
- (3) 确定水泥土施工配合比;
- (4) 确认水泥搅拌桩无侧限抗压强度、桩顶高程、深度等指标能够满足设计要求;
- (5) 确定施工工艺参数及搅拌路径曲线。

4.3.2 现场工艺试验应验证施工装备的贯入能力、工艺参数和定位控制精度等,确定其适用性。其中,工艺参数应包括下列内容:

- (1) 水泥浆的输浆量、喷浆流量;
- (2) 搅拌机具的下贯、提升速度;
- (3) 搅拌轴转速;
- (4) 喷水量;
- (5) 切割搅拌次数;
- (6) 贯入持力层时的电流值。

4.3.3 现场工艺试验持力层判定标准,应采用贯入持力层时的电流值。

4.3.4 现场工艺试验所需的水泥、外加剂等材料种类及用量,应以室内水泥土配合比试验结果为依据。

4.3.5 现场工艺试验的配合比应根据室内水泥土配合比试验结果选用,且不宜少于3种,每种配合比试桩数不宜少于3根或3簇。根据试验桩桩体性能检验结果,分析确定合理的配合比及工艺参数。桩体性能不满足设计要求时,应根据现场地质条件调整配合比、工艺参数,重新开展现场工艺试验,直至桩体性能满足设计要求。

5 施工过程质量控制

5.1 一般规定

- 5.1.1 水下深层水泥搅拌桩法施工原材料在进场前应进行检测,检测合格后方可进场。
- 5.1.2 施工工艺参数可根据现场地质情况适当调整。
- 5.1.3 桩体质量控制应实时监测桩位坐标、搅拌头高程、搅拌轴垂直度、搅拌轴提升和下贯速度、搅拌轴转速、喷浆和喷水流量等,并定期校核搅拌轴提升和下贯速度、搅拌轴转速、喷浆和喷水流量及搅拌叶片有效直径等。
- 5.1.4 施工过程中使用的计量仪器应在计量检定或校准有效期内。
- 5.1.5 水下深层水泥搅拌桩法地基加固施工时,宜避开冬期施工;无法避开时,应采取防冻措施。

5.2 施工装备

- 5.2.1 水下深层水泥搅拌桩法施工装备应符合下列规定。
 - 5.2.1.1 施工管理控制系统应具备参数设定和实时监控功能,且能自动生成施工记录报表,实时显示搅拌路径曲线。监控内容应包括桩位坐标、喷水流量、喷浆流量、喷浆压力、搅拌转速、搅拌转向、提升和下贯速度、搅拌头高程、垂直度、施工电流值等,数据采集间隔不宜大于5s。
 - 5.2.1.2 每台深层水泥搅拌机具应具备独立的施工参数监控系统。
 - 5.2.1.3 定位系统应满足桩位控制精度的要求。
 - 5.2.1.4 搅拌机具应满足下列要求:
 - (1)搅拌叶片设置2层以上,搅拌直径不小于1.0m;
 - (2)同一搅拌头相邻搅拌叶片投影重叠宽度不小于桩径的1/6,且不小于200mm;
 - (3)搅拌轴数量不少于2个;
 - (4)搅拌头在最上层搅拌叶片的上部和最下层搅拌叶片的下部分别设置上、下喷浆口。
 - 5.2.1.5 输浆管道宜采用透明管道,管道宜平顺,转角处宜成钝角。
 - 5.2.1.6 材料计量仪器宜专料专秤,并应具备抗振动能力。
 - 5.2.1.7 浆液拌制系统应具备水泥、水、外加剂等材料用量的自动化控制功能。
- 5.2.2 一体化深层搅拌施工装备应符合下列规定。
 - 5.2.2.1 施工专用船舶姿态控制能力应满足桩体倾斜精度要求。
 - 5.2.2.2 水泥舱应具备监测空舱、满舱的功能。

5.2.2.3 桩架应具备深层水泥搅拌机具间距调节能力,宜采用可便捷调节结构。

5.2.3 一体化深层搅拌施工装备施工,应配置拖轮、锚艇、交通艇、水泥供应船等辅助装备。

5.3 材 料

5.3.1 水泥和外加剂的质量应符合国家现行有关标准的要求。

5.3.2 拌和用水可采用海水或淡水,不得含有碎屑、油渍、有机物、浮泥等影响桩体质量的杂质。

5.3.3 水泥浆在储浆罐内储存时间不宜大于 2h;在水泥浆中加入缓凝剂并在储浆罐内缓慢搅拌的情况下,储存时间不应大于 3h。

5.3.4 同一桩簇的水泥浆,应采用同一批次生产的水泥。

5.3.5 对于每台拌浆设备拌制的水泥浆液,每工作班应至少抽检 2 次水泥浆密度。

5.3.6 水泥浆密度与计算值允许偏差应为 $\pm 3\%$ 。

5.3.7 单簇桩实际水泥总用量不应少于计算量,且不宜大于计算量的 3%。

5.4 施 工 工 艺

5.4.1 设计桩顶高程以上应有不少于 2m 的覆土,覆土厚度不足时应铺设砂垫层,砂垫层材料最大粒径不宜大于 20mm。

5.4.2 深层水泥搅拌机具坐标控制应满足设计要求,施工过程中桩位偏差不应大于 10cm。

5.4.3 桩底高程应以最下层搅拌叶片位置为基准进行控制,且不应高于设计高程。

5.4.4 水下深层水泥搅拌桩法施工可分为下贯、底部处理、提升三个阶段。

5.4.5 下贯阶段应符合下列规定。

5.4.5.1 下贯速度可根据设备性能和贯入难易程度调整,在接触硬土层或深层水泥搅拌机具电流显著提高前,宜以较快速度下贯。

5.4.5.2 处理深层土层或硬土层时宜降低下贯速度,并适量喷水,喷水量应综合考虑配合比、土体性质等因素,长时间无法下贯时应及时处理。

5.4.6 底部处理阶段应符合下列规定。

5.4.6.1 硬土层宜反复搅拌,反复搅拌时提升高度宜超过硬土层顶部 1m ~ 3m。

5.4.6.2 桩底部 1m ~ 2m 范围内应反复提升和下贯,或停驻搅拌,直至底部切割搅拌次数满足设计要求。

5.4.7 提升阶段应符合下列规定。

5.4.7.1 搅拌轴应反向旋转。

5.4.7.2 处理黏土层时,宜提高切割搅拌次数。

5.4.7.3 搅拌头提升至桩顶 3m 附近时,宜降低提升速度和转速,减小喷浆流量。

5.4.7.4 搅拌桩停浆面应高于桩顶设计高程 300mm ~ 500mm。

5.4.8 水下深层水泥搅拌桩法施工下贯阶段需要喷水时,宜根据土层类型及贯入难度调

整喷水量。黏土层宜控制水泥土总含水率在液限附近。

5.4.9 搅拌过程中各阶段搅拌头旋转速度和方向不宜频繁变化。

5.4.10 水下深层水泥搅拌桩法施工应根据桩长、土层性质、设备性能综合选择喷浆方式,喷浆应符合下列规定。

5.4.10.1 喷浆可在下贯阶段或提升阶段进行,下贯阶段喷浆应采用下喷浆口,提升阶段喷浆应采用上喷浆口。

5.4.10.2 下贯喷浆应充分考虑设备性能、施工时长及水泥初凝时间,避免水泥初凝导致无法提升。

5.4.10.3 同一根桩在不同阶段多次喷浆时,搭接长度宜为 0.3m ~ 0.5m;同时应考虑喷水与喷浆的转换时间,转换时间应根据实际工况实测确定;管道中留存的水量不应计入喷浆量。

5.4.10.4 喷浆施工应考虑喷浆系统的时间滞后性,滞后时间应根据实际工况实测确定。

5.4.11 单桩施工结束后应清洗管道和搅拌头,管道清洗宜采用高压空气加高压水的混合冲洗方式,搅拌头宜采用高压水枪冲洗去除表面附土。

5.4.12 水下深层水泥搅拌桩法施工采用其他喷浆方式或施工工艺,应经过现场工艺试验验证。

5.4.13 水下深层水泥搅拌桩法施工主要工艺参数的控制应符合下列规定。

5.4.13.1 搅拌头下贯与提升速度宜为 0.2m/min ~ 1.0m/min。

5.4.13.2 处理浅层松软土层时,应减少水泥浆流失,搅拌头提升速度宜为 0.2m/min ~ 0.5m/min。

5.4.13.3 搅拌头喷浆流量应根据下贯或提升的速度、喷浆量要求进行控制,计算方法按附录 B 执行。

5.4.14 施工过程中主要施工工艺参数控制应符合下列规定。

5.4.14.1 搅拌轴的垂直度应实时监测,且小于 1/100。

5.4.14.2 搅拌叶片的转速允许偏差应为 $\pm 2r/min$ 。

5.4.14.3 搅拌轴下贯或提升速度的允许偏差应为 $\pm 0.1m/min$ 。

5.4.14.4 不同土层的切割搅拌次数(*BRN*)应根据工艺试验确定,且不应小于 400r/m。

5.4.15 对于特殊土层,有历史施工数据时,可建立检测结果与土层参数、工艺参数的对应关系,通过计算不同土层的施工工艺参数与检测结果的皮尔逊相关系数,确定各土层的主要影响因素并进行控制,相关系数计算方法可按附录 C 执行。

5.4.16 相邻桩簇搭接长度应满足设计要求;桩簇搭接施工时间不宜大于 3d。当大于 3d 时,可在搭接处的桩位进行不喷水、不喷浆的下贯搅拌,预留后续搭接的水下深层水泥搅拌桩桩位。

5.4.17 搅拌叶片应定期检查,有效搅拌直径减小量不得大于 10mm。

5.4.18 施工过程中应根据土体性质、处理深度、喷浆量、置换率、场地周边环境等因素,通过调整施工工艺、施工顺序等措施控制土体隆起。桩簇施工宜按泥面高程先高后低的

顺序进行。

5.5 计量仪器精度与校验

5.5.1 计量仪器精度应符合表 5.5.1 的要求。

表 5.5.1 计量仪器精度

仪器名称	计量对象	计量单位	计量精度
电子秤	水泥质量	kg	0.1
流量计	水体积	L	1.0
电子秤	外加剂质量	kg	0.01
泥浆比重计	水泥浆比重	—	0.01
流量计	喷水流量	L/min	0.1
	喷浆流量	L/min	0.1
测斜仪	倾斜角度	(°)	0.01
频率表	搅拌轴转速	r/min	1
绝对值编码器	换算高程	m	0.01
电流表	深层水泥搅拌机具电流	A	0.1
荷载仪	搅拌机具荷重	t	0.1
卷尺	叶片长度	mm	1

5.5.2 计量仪器精度应定期校验,并应在施工前对其状态进行核查。

6 质量检验

6.1 一般规定

- 6.1.1** 水下深层水泥搅拌桩质量检验应包括施工过程和施工后的质量检验。
- 6.1.2** 水下深层水泥搅拌桩质量检验前应制定检验方案,明确检验内容、依据、仪器设备、人员等内容。
- 6.1.3** 检测用计量仪器设备性能应符合现行行业标准《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237)的有关规定。

6.2 检测项目

- 6.2.1** 水下深层水泥搅拌桩施工过程应对每桩簇施工记录和计量记录进行统计分析,包括水泥浆的每米用量和总量、水泥浆密度、桩体平面位置及垂直度、切割搅拌次数等。
- 6.2.2** 水下深层水泥搅拌桩施工后的质量检测,主要包括单桩或桩簇、复合地基检测。
- 6.2.3** 水下深层水泥搅拌桩法地基加固检测项目宜根据地基使用要求、设计要求以及施工阶段等按表 6.2.3 选取。

表 6.2.3 检测项目

序号	检测项目	成桩过程	成桩后	
			试验桩	工程桩
1	桩位	▲	○	○
2	搅拌头高程	▲	○	○
3	垂直度	▲	○	○
4	水泥流量	▲	○	○
5	桩顶高程	○	▲	▲
6	桩长	○	▲	▲
7	桩体强度	○	▲	▲
8	桩体均匀性	○	▲	▲
9	桩端持力层	○	▲	▲
10	桩体弹性模量	○	△	△
11	旁压模量	○	△	△
12	桩体渗透系数	○	△	△

续表 6.2.3

序号	检测项目	成桩过程	成桩后	
			试验桩	工程桩
13	复合地基承载力	○	△	△
14	复合地基变形模量	○	△	△

注:①“▲”表示应检项目,“△”表示可检项目,“○”表示不作要求;

②桩体均匀性评价标准应符合现行行业标准《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340)的有关规定。

6.2.4 桩体抽检位置应随机、均匀选择并有代表性,对下列区域应重点检测:

- (1)局部岩土条件复杂或突变的区域;
- (2)施工过程中出现异常、成桩质量存在风险的区域;
- (3)对基础有特殊要求的区域。

6.3 检测方法

6.3.1 水下深层水泥搅拌桩法地基加固检测应综合考虑检测项目、周边环境条件等因素合理选择检测方法与频次,宜按表 6.3.1 选取。

表 6.3.1 检测方法与频次

序号	检测项目	成桩后	
		检测方法	检测频次
1	桩顶高程	钻孔取芯	检测数量不少于总桩数的 1%,且不少于 6 个桩簇,无侧限抗压强度按有效桩长每米取 1 个试样
2	桩长	钻孔取芯	
3	桩体强度	无侧限抗压试验	
4	桩体均匀性	钻孔取芯	
5	桩端持力层	标准贯入试验	按设计要求
6	桩体弹性模量	弹性模量试验	按设计要求
7	旁压模量	旁压试验	按设计要求
8	桩体渗透系数	室内渗透试验	按设计要求
9	复合地基承载力	水下载荷板试验	按设计要求
10	复合地基变形模量	水下载荷板试验	按设计要求

注:①试验桩宜 100% 检测;

②当采用钻芯法难以判别桩底持力层或设计对持力层有特殊要求时,可在桩底增加标准贯入试验检测持力层;

③桩体渗透系数试验方法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;

④当需要确定桩体水平方向的应力应变关系时,宜进行旁压试验。

6.3.2 水下深层水泥搅拌桩法地基加固检测龄期应符合下列规定。

6.3.2.1 钻孔取芯龄期不宜早于设计规定的龄期。

6.3.2.2 复合地基承载力检测不宜早于 28d,当设计对龄期有明确要求时,应满足设

计要求。

6.3.3 钻孔取芯水上作业应符合下列规定。

6.3.3.1 受检桩钻孔位置宜在距单桩中心 20cm 处。

6.3.3.2 钻孔取芯法应采用三重管取样器取样,芯样直径不宜小于 100mm,每次取芯长度不宜大于 1m,取芯率不应低于 80%。

6.3.3.3 钻孔取芯深度应钻至桩端以下不小于 1m;对于桩端未达到设计深度的桩,应钻至桩端以下不小于 5m。

6.3.3.4 芯样应按实际成桩长度,在桩顶设计高程以下每米取一个芯样进行无侧限抗压强度试验检测。

6.3.4 桩体弹性模量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。

6.3.5 水下载荷板试验应符合下列规定。

6.3.5.1 水下载荷板试验可采用锚桩法、堆载法或锚桩和堆载联合进行,当采用锚桩法时应验算检测平台的稳定性。

6.3.5.2 承压板下应铺设中粗砂或碎石垫层,厚度不应小于 150mm,且不宜大于 800mm。

6.3.5.3 采用锚桩法时,平台不应与试验桩和基准桩相连,高程应考虑水位和风浪等影响,锚桩的净间距不应小于承压板直径或宽度的 3 倍,锚桩反力系统可提供的最大反力不得小于预估最大试验荷载的 1.3 倍,试验过程中宜对试验平台进行安全监测。

6.3.5.4 采用堆载法时,压重宜在检测前一次加足,并均匀稳固地堆置于平台上,压重施加于地基的压应力不宜大于地基承载力设计值的 1.5 倍。

6.3.5.5 采用锚桩和堆载联合提供反力时,压载重物应对称堆放,并应考虑反力系统的整体稳定性。

6.3.5.6 承压板沉降宜采用静力水准仪在水下测量,基准桩与承压板边的净距不应小于承压板直径或宽度,且不应小于 3m,基准桩与锚桩间距不应小于锚桩直径的 3 倍。

6.3.5.7 加载方式应采用分级维持荷载沉降相对稳定法,加载等级宜取 8 级~12 级,且不应少于 8 级,荷载量测精度不应低于施加最大荷载的 $\pm 1\%$,最大试验荷载不应小于设计承载力的 2 倍。

6.3.5.8 承压板沉降相对稳定标准宜为每小时沉降量小于 0.1mm,稳定后可施加下一级荷载。

6.3.5.9 数据记录、试验终止标准、数据分析与评定等应符合现行行业标准《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237)的有关规定。

6.3.5.10 水下载荷板试验检测期间,距受检桩 50m 范围内不得进行施工作业,严禁船舶碰撞检测平台。

6.3.6 标准贯入试验和旁压试验应符合现行行业标准《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237)的有关规定。

6.4 质量评价

6.4.1 单桩簇施工过程中出现下列情况之一时,宜增加作为受检桩:

(1)单桩簇水泥浆实际注浆量小于理论注浆量;

(2)施工桩长未达到设计要求深度,且无资料显示该桩簇在施工时已达到深层水泥搅拌机具下贯能力的极限。

6.4.2 水泥土不同龄期强度之间的换算应符合现行行业标准《水运工程地基设计规范》(JTS 147)的有关规定。

6.4.3 水下深层水泥搅拌桩检验项目样本数较少时,受检桩桩体强度应按检验批进行评价,受检桩的桩体均匀性和桩底持力层岩土性状按单桩进行评价,评价结果应满足设计要求。桩体质量检测出现下列情况之一时应判定为该桩簇不合格:

(1)单桩簇超过 10% 的试样无侧限抗压强度小于设计强度;

(2)单桩簇无侧限抗压强度平均值小于设计强度。

6.4.4 桩簇判定为不合格时,应在同一桩簇上进行第二次取芯检测,并应另抽取与不合格桩簇在同一天由同一台深层水泥搅拌机具施工的 2 个桩簇,进行扩大取芯检测。

6.4.5 无侧限抗压强度检验样本数较多或出现不合格检测桩时,可按下列方法对检验批进行综合评价。

6.4.5.1 水下深层水泥搅拌桩体检验批强度特征值按下列公式计算:

$$\bar{q}_{uf} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6.4.5-1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n} \right]} \quad (6.4.5-2)$$

$$q_{uck} = \bar{q}_{uf} - K\sigma \geq q_d \quad (6.4.5-3)$$

$$\delta = \frac{\sigma}{\bar{q}_{uf}} \quad (6.4.5-4)$$

式中 \bar{q}_{uf} ——现场水下深层水泥搅拌桩实际桩体强度平均值(MPa);

x_i ——第 i 个无侧限抗压强度检测值(MPa);

n ——无侧限抗压检测样本总数;

σ ——现场水下深层水泥搅拌桩实际桩体强度标准差(MPa);

q_{uck} ——现场水下深层水泥搅拌桩检验批强度特征值(MPa);

K ——反映桩体实测强度大于桩体设计强度置信度的系数,可由相应的置信度计算得到,一般取 1.0,当对地基有特殊要求,根据设计设定的置信度按表 6.4.5 取值;

q_d ——水下深层水泥搅拌桩体设计强度(MPa);

δ ——现场水下深层水泥搅拌桩实际桩体强度变异系数。

表 6.4.5 系数 K 与置信度的关系表

合格置信度(以百分数计)	69.1	84.1	95.0	97.7	99.87
系数 K	0.5	1.0	1.645	2.0	3.0

6.4.5.2 现场水下深层水泥搅拌桩检验批的强度特征值不应小于设计值,变异系数宜小于 0.35,且不应大于 0.5。

6.4.6 水下深层水泥搅拌桩簇除无侧限抗压强度外的其他检测项目,其评价方法应符合现行行业标准《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237)的有关规定,检测结果应满足设计要求。

6.4.7 桩簇第二次取芯检测结果仍不合格时,应按设计要求补桩。

附录 A 水泥土用料及用水计算方法

A.0.1 试样数量和试模规格应根据试验方案确定,取用湿土质量不应小于下式计算值:

$$m_s = n_t v_s \rho_s \quad (\text{A.0.1})$$

式中 m_s ——湿土质量(kg);
 n_t ——试样数量;
 v_s ——试模体积(cm^3);
 ρ_s ——土样湿密度(kg/cm^3)。

A.0.2 试验所需风干土质量应按下式计算:

$$m_{sd} = \frac{1 + w_d}{1 + w} m_s \quad (\text{A.0.2})$$

式中 m_{sd} ——风干土质量(kg);
 w_d ——风干土含水率;
 w ——土的天然含水率;
 m_s ——湿土质量(kg)。

A.0.3 试验风干土样需补充水质量应按下式计算:

$$m_{sdw} = m_s \frac{w}{1 + w} - m_{sd} \frac{w_d}{1 + w_d} \quad (\text{A.0.3})$$

式中 m_{sdw} ——风干土需补充水质量(kg);
 m_s ——湿土质量(kg);
 w ——土天然含水率;
 m_{sd} ——风干土质量(kg);
 w_d ——风干土含水率。

A.0.4 掺入水泥的质量应按下式计算:

$$m_c = n_t v_s a_c \quad (\text{A.0.4})$$

式中 m_c ——水泥质量(kg);
 n_t ——试样数量;
 v_s ——试模体积(cm^3);
 a_c ——水泥掺量(kg/m^3)。

A.0.5 制备水泥浆需掺入水的质量应按下式计算:

$$m_w = m_c \mu \quad (\text{A.0.5})$$

式中 m_w ——水泥浆需掺入水的质量(kg);
 m_c ——水泥质量(kg);

μ ——水泥浆水灰比。

A.0.6 外加剂质量应按下式计算：

$$m_a = a_a m_c \quad (\text{A.0.6})$$

式中 m_a ——外加剂质量(kg)；

a_a ——外加剂掺量,可根据外加剂性能按经验取值；

m_c ——水泥质量(kg)。

A.0.7 总含水率应按下式计算：

$$w_t = w + \mu \frac{m_c (1 + w_d)}{m_{sd}} \quad (\text{A.0.7})$$

式中 w_t ——总含水率；

w ——土的天然含水率；

μ ——水泥浆水灰比；

m_c ——水泥质量(kg)；

w_d ——风干土含水率；

m_{sd} ——风干土质量(kg)。

附录 B 切割搅拌次数、每米喷浆量及喷浆流量计算方法

B.0.1 切割搅拌次数应按下式计算：

$$BRN = \Sigma M \cdot \left(\frac{N_u}{V_u} + \frac{N_d}{V_d} \right) \quad (\text{B.0.1})$$

式中 BRN ——切割搅拌次数(r/m)；

ΣM ——单根钻杆搅拌叶片总数；

N_u ——搅拌提升转动速度(r/min)；

N_d ——搅拌下贯转动速度(r/min)；

V_u ——搅拌提升速度(m/min)；

V_d ——搅拌下贯速度(m/min)。

B.0.2 每米喷浆量应按下式计算：

$$Q_0 = \frac{1000 S_s a_c (1 + \mu)}{\rho_0} \quad (\text{B.0.2})$$

式中 Q_0 ——每米喷浆量(L/m)；

S_s ——每簇深层水泥搅拌桩截面面积(m²)；

a_c ——水泥掺量(kg/m³)；

μ ——水泥浆水灰比；

ρ_0 ——水泥浆密度(kg/m³)。

B.0.3 喷浆流量应按下式计算：

$$V_0 = Q_0 V_u \quad (\text{B.0.3})$$

式中 V_0 ——喷浆流量(L/min)；

Q_0 ——每米喷浆量(L/m)；

V_u ——搅拌提升速度(m/min)。

附录 C 皮尔逊相关系数计算方法

C.0.1 皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient)应按下列式计算:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{C.0.1})$$

式中 r ——皮尔逊相关系数;
 n ——样本数;
 x_i ——随机变量 X 的样本值;
 \bar{x} ——随机变量 X 的平均值;
 y_i ——随机变量 Y 的样本值;
 \bar{y} ——随机变量 Y 的平均值。

附录 D 本标准用词说明

为便于在执行本标准条文时区别对待,对要求严格程度的用词说明如下:

- (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)表示允许选择,在一定条件下可以这样做的采用“可”。

引用标准名录

1. 《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266)
2. 《水运工程地基设计规范》(JTS 147)
3. 《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237)
4. 《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233)
5. 《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340)

附加说明

本标准主编单位、参编单位、主要起草人、
主要审查人、总校人员和管理组人员名单

主编单位:中交第四航务工程局有限公司

参编单位:中交四航工程研究院有限公司

中交四航局第二工程有限公司

广州港湾工程质量检测有限公司

中交天津港湾工程研究院有限公司

中交第四航务工程勘察设计院有限公司

主要起草人:吕卫清(中交第四航务工程局有限公司)

陈平山(中交四航工程研究院有限公司)

李汉渤(中交四航局第二工程有限公司)

(以下按姓氏笔画为序)

王 新(广州港湾工程质量检测有限公司)

刘志军(中交四航工程研究院有限公司)

汤 明(中交四航局第二工程有限公司)

苏林王(中交四航工程研究院有限公司)

肖阳春(中交四航局第二工程有限公司)

何丽平(中交四航工程研究院有限公司)

何洪涛(中交第四航务工程勘察设计院有限公司)

张克浩(中交第四航务工程局有限公司)

林佑高(中交第四航务工程勘察设计院有限公司)

寇晓强(中交天津港湾工程研究院有限公司)

喻志发(中交天津港湾工程研究院有限公司)

谭德银(中交第四航务工程局有限公司)

滕 超(中交四航工程研究院有限公司)

主要审查人:仇伯强

(以下按姓氏笔画为序)

叶观宝、刘亚平、张志明、张晴波、陈 林、周 骏、黄 勇、

梁 萌、程泽坤

总校人员:李雪莲、秦川、仇伯强、张志明、梁萌、李荣庆、董方、
檀会春、吕卫清、苏林王、陈平山、李汉渤、喻志发、肖阳春、
王新、张克浩、滕超

管理组人员:苏林王(中交四航工程研究院有限公司)
陈平山(中交四航工程研究院有限公司)
滕超(中交四航工程研究院有限公司)

中华人民共和国行业标准

**水下深层水泥搅拌桩法
施工质量控制与检验标准**

JTS/T 325—2024

条文说明

目 次

2 术语	(27)
3 基本规定	(28)
4 配合比设计与现场工艺试验	(29)
4.1 一般规定	(29)
4.2 水泥土配合比设计	(29)
4.3 现场工艺试验	(29)
5 施工过程质量控制	(30)
5.1 一般规定	(30)
5.2 施工装备	(30)
5.4 施工工艺	(30)
6 质量检验	(36)
6.3 检验方法	(36)
6.4 质量评价	(36)
附录 C 皮尔逊相关系数计算方法	(40)

2 术 语

2.0.2 通常深层水泥搅拌桩是一次加固形成的单个圆柱体,深层水泥搅拌桩簇是一次加固形成的多个柱体相互搭接的水泥土拌合体,如图 2.1 所示。

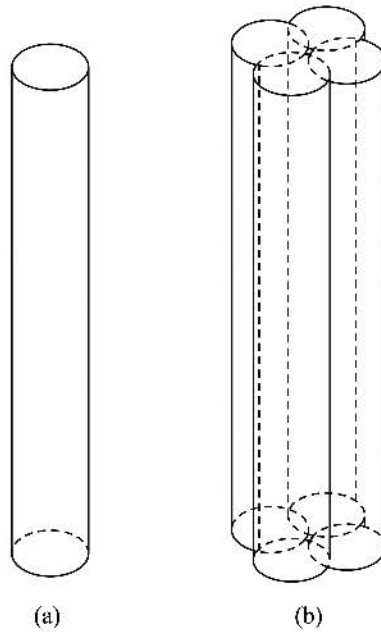


图 2.1 深层水泥搅拌桩和桩簇示意图
(a) 深层水泥搅拌桩; (b) 深层水泥搅拌桩簇

3 基本规定

3.0.2 水下深层水泥搅拌桩法应用流程及质量控制要点如图 3.1 所示。

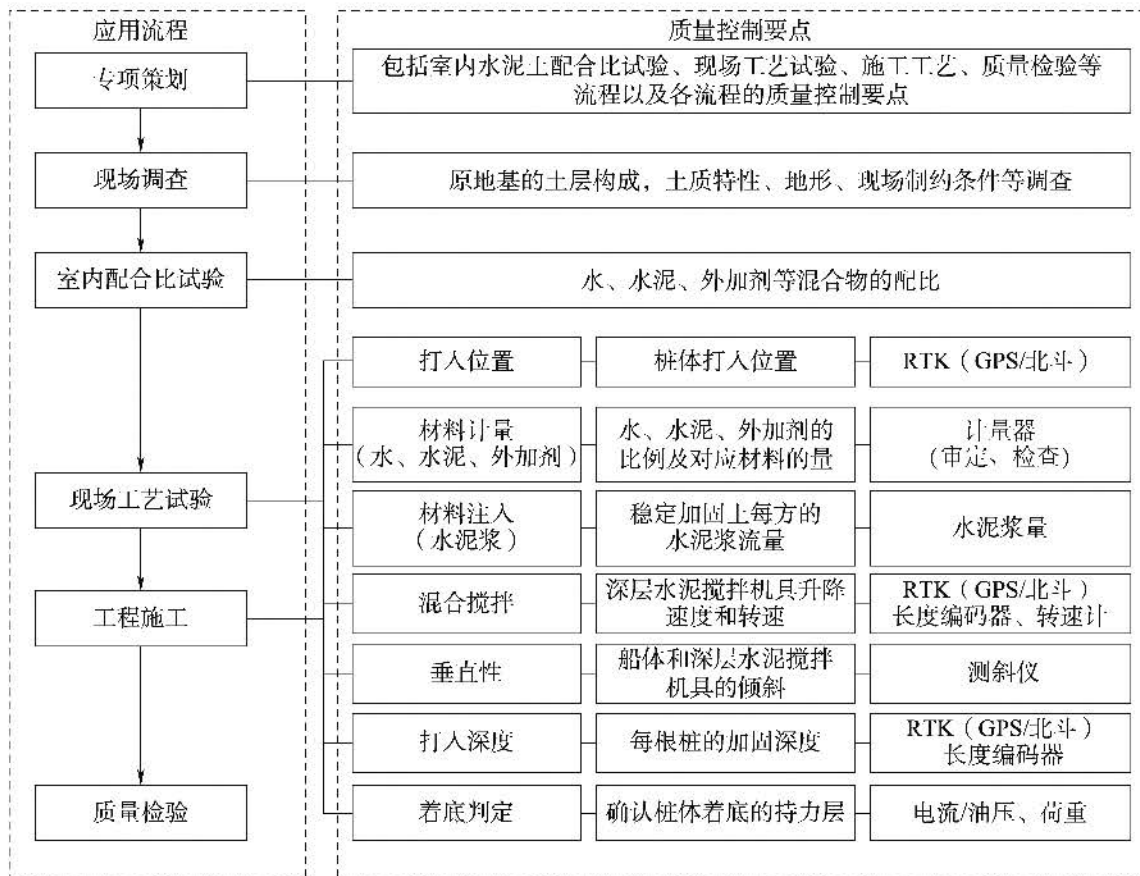


图 3.1 水下深层水泥搅拌法应用流程及质量控制要点图

3.0.3 当处理泥炭土、有机物含量较高的土时,水泥与有机质土搅拌会阻碍水泥的水化反应,影响水泥土强度增长,一般采取提高水泥掺量,添加磷石膏等措施;当黏土的塑性指数大于 25 时,搅拌头叶片容易“糊泥”并形成泥团,固化剂难以与土充分拌和,一般采取提高切割搅拌次数的措施;当地下水 pH 值小于 4 时,水中的酸性物质与水泥发生反应,对水泥土形成结晶性侵蚀,使水泥土出现开裂、崩解,进而丧失强度,加固效果差,一般采取掺加石灰的措施,选用耐酸性水泥。因此,规定应通过室内试验和现场工艺试验确定适用性。

4 配合比设计与现场工艺试验

4.1 一般规定

4.1.5 条文中“必要时”一般是指地区经验不足、水泥石强度增长规律不明确或有特殊要求等。

4.2 水泥石配合比设计

4.2.4 当采用水泥掺入比进行配合比试验,假设基准值取 12%,则根据项目需要,在基准值的基础上增减 2%,即水泥掺入比为 10% 或 14%;当采用水泥掺量进行配合比试验时,假设基准值取 $220\text{kg}/\text{m}^3$,则根据项目需要,在基准值的基础上增减 $20\text{kg}/\text{m}^3$,即水泥掺量为 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $240\text{kg}/\text{m}^3$ 。

4.2.5 行业标准《水泥石配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)推荐水灰比“按设计要求或当地经验确定,也可取 0.45 ~ 2.0”;行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)推荐“湿法的水泥浆水灰比可取 0.5 ~ 0.6”;日本《港湾·空港における深層混合処理工法技術マニュアル》(2018 版)推荐“水灰比一般 0.6 ~ 1.0,但最好根据地基的强度、含水率及处理机喷浆量来确定”“ 4.6m^2 、 5.7m^2 级的中、大型船施工过程中进行了 0.6 ~ 0.7 的水灰比施工,也有以 0.8 ~ 1.0 施工的”“使用 2.2m^2 级的小型船工程中,水灰比控制在 0.6 ~ 1.0 范围内”;国内多艘专业施工船舶为避免水泥浆流动性差导致堵管,取水灰比 0.9 的相对较多,综合考虑各规范的推荐范围、可操作性及实际情况,因此作出本条规定。

4.2.6 已有水下深层水泥搅拌桩处理工程研究发现,水泥搅拌桩处理黏土时,黏土存在一个相对最佳的总含水率,总含水率接近液限时水泥石强度高,增加一项水泥石总含水率等于土体液限值的配合比试验,以便获得更合理的配合比并为正式施工时控制喷水量提供依据。

4.3 现场工艺试验

4.3.5 现场工艺试验通常采取高、中、低三种配合比方案进行试验,在有经验的工程区域,按已建项目情况进行选用。

5 施工过程质量控制

5.1 一般规定

5.1.5 本条中的“冬期施工”在《建筑工程冬期施工规程》(JGJ/T 104—2011)中有相关规定。

5.2 施工装备

5.2.1.4 搅拌头典型结构如图 5.1 所示。

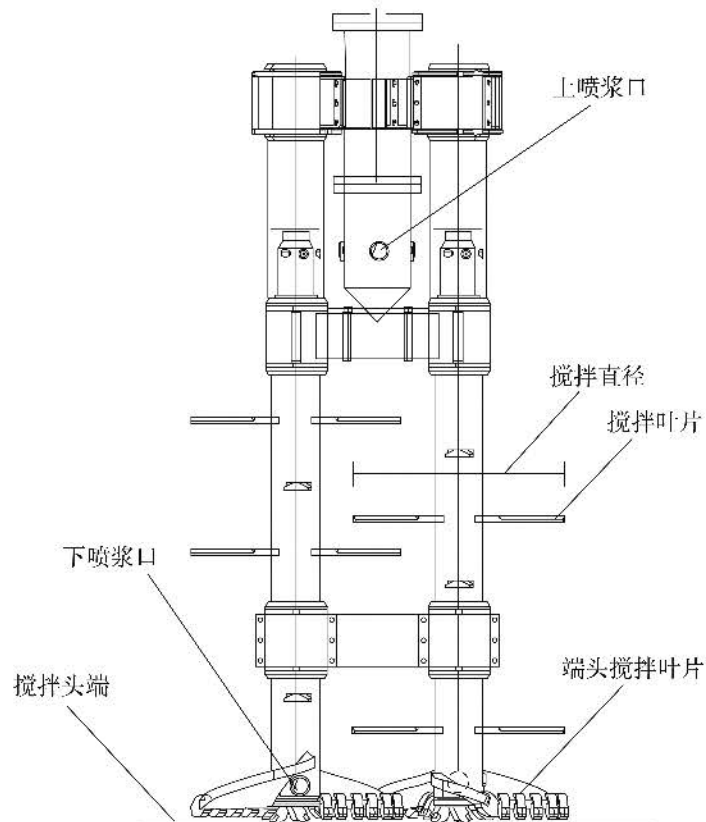


图 5.1 搅拌头典型结构图

5.4 施工工艺

5.4.1 铺设砂垫层是为了减少浆液流失,提高表层土体成桩质量,砂垫层材料一般选用中砂、粗砂、级配砂石等,如图 5.2 所示。

5.4.5.2 处理深层土体时,搅拌机具自身受到的侧摩阻力较大,本身难以维持高速下

贯,喷水不仅可软化土层,促进搅拌机具下贯,同时还能防止外部土体挤入阻塞喷浆口;对于硬土层可以适量加大喷水量以利下贯,对于软土层适量喷水能够防止土体挤入阻塞喷浆口。

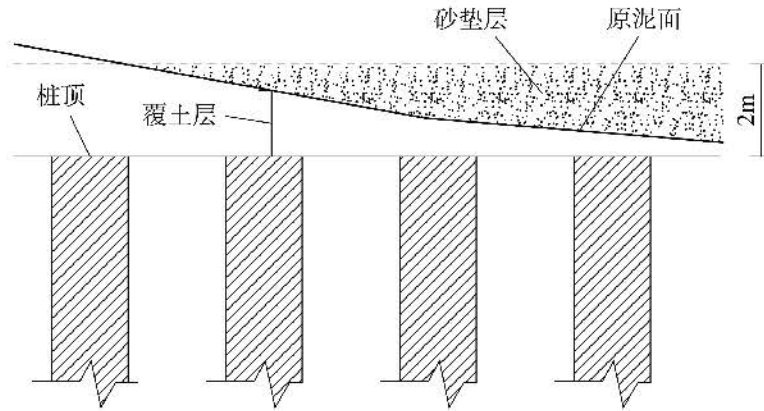


图 5.2 覆盖层示意图

5.4.6.2 在桩体上部切割搅拌次数(BRN)计算中,搅拌叶片全部通过加固土体,但在底部桩体处理时,搅拌叶片并未全部通过底部桩体,如图 5.3 所示。此时统计底部土体切割搅拌次数,只将通过该土层的搅拌叶片数计入其中。

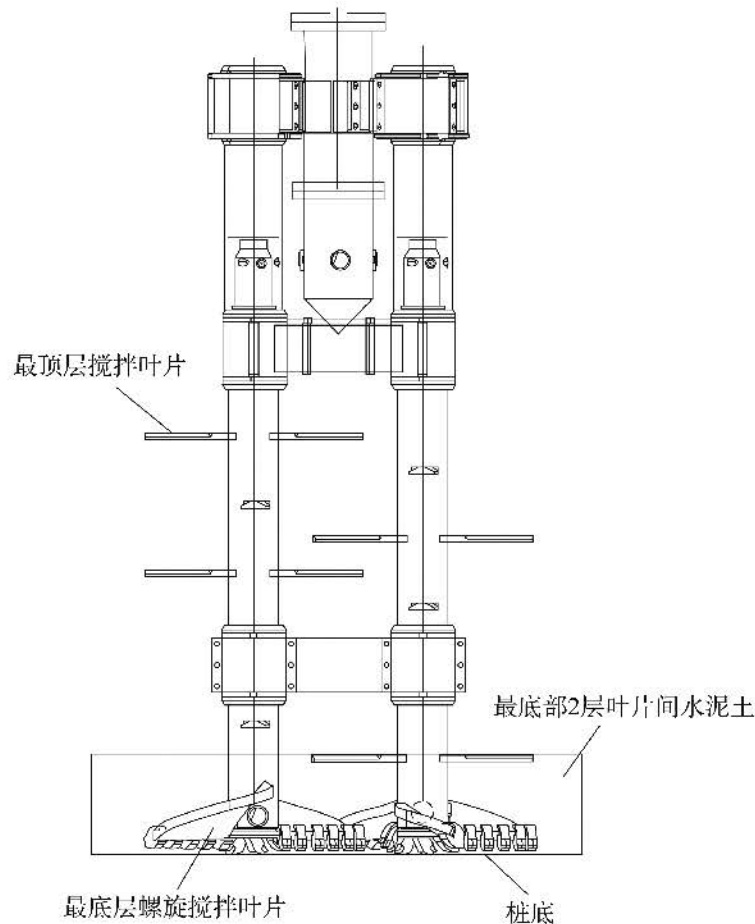


图 5.3 搅拌头触底时有效搅拌叶片示意图

5.4.8 对于浅表层土,其含水率高,贯入阻力小,下贯过程中不用喷水;对于淤泥、淤泥质土,过量喷水会降低桩体强度,不喷水易堵塞喷浆口,在保证喷浆口不被堵塞的前提下,尽量少喷水;对于黏土层,统计分析表明,当总含水率达到液限附近时其桩体强度平均值最高,此时计算总含水率时考虑加固过程中的喷水量,总含水率为水泥土中水总质量与干土质量之比,总含水率按下式计算:

$$w_t = \frac{\rho \cdot S_a \cdot h \cdot \frac{w}{1+w} + \rho_w \cdot Q_{wh} \cdot S_a \cdot h + a_c \cdot \mu \cdot S_a \cdot h}{\rho \cdot S_a \cdot h \cdot \frac{1}{1+w}} \quad (5-1)$$

$$= w + \frac{\rho_w \cdot Q_{wh} (1+w)}{\rho} + \frac{a_c \cdot \mu \cdot (1+w)}{\rho}$$

式中 w_t ——总含水率;

ρ ——土体天然密度(kg/m^3);

S_a ——每簇深层水泥搅拌桩截面面积(m^2);

h ——水泥搅拌桩加固深度(m),通常取1m;

w ——土的天然含水率;

ρ_w ——水的密度(kg/m^3);

Q_{wh} ——水泥搅拌桩加固深度范围内喷水量与加固土体的体积比值;

a_c ——水泥掺量(kg/m^3);

μ ——水泥浆水灰比。

5.4.10 水下深层水泥搅拌桩成桩方式通常有提升喷浆成桩和下贯喷浆成桩两种,如图5.4所示。下贯喷浆成桩方式有利于桩体长度方向的连续性、结合性,提高搅拌均匀性,但若下贯时设备发生故障,水泥土初凝时易导致机械设备损坏,甚至无法拔出搅拌头的情况;提升喷浆成桩由于下贯时不喷浆,即使出现机械故障,也不会影响搅拌头提升。所以对于需穿过软弱层且桩底达到稳定持力层的水下深层水泥搅拌桩,一般采用提升喷浆方式进行处理。

水下深层水泥搅拌桩法施工采用提升喷浆工艺时,其典型搅拌路径曲线主要分为下贯段、底部处理段、提升段三个阶段,如图5.5所示。

提升喷浆典型搅拌路径曲线,底部处理阶段的底部切土段路径③(1次提升、下贯搅拌)循环次数不少于1次;底部搅拌段的路径⑦(1次提升、下贯搅拌)循环次数不少于2次,路径③、⑦具体循环次数根据现场工艺试验搅拌桩底部的处理效果来确定。

桩底处在软弱层的短桩,采用下贯喷浆工艺增加切割搅拌次数,有利于保证成桩质量,下贯喷浆典型搅拌路径曲线如图5.6所示。

水下深层水泥搅拌桩下贯段喷浆搅拌路径曲线底部处理阶段的路径③(1次提升、下贯搅拌)循环次数不少于1次,驻停搅拌时间以控制搅拌桩底部的切割搅拌次数达到设计要求为准。

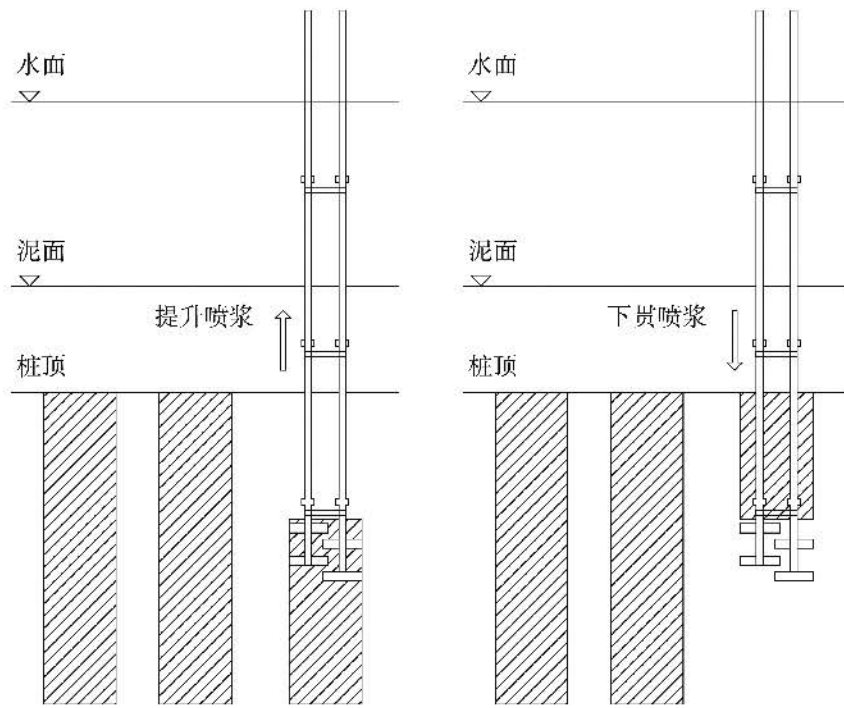


图 5.4 提升喷浆与下贯喷浆示意图

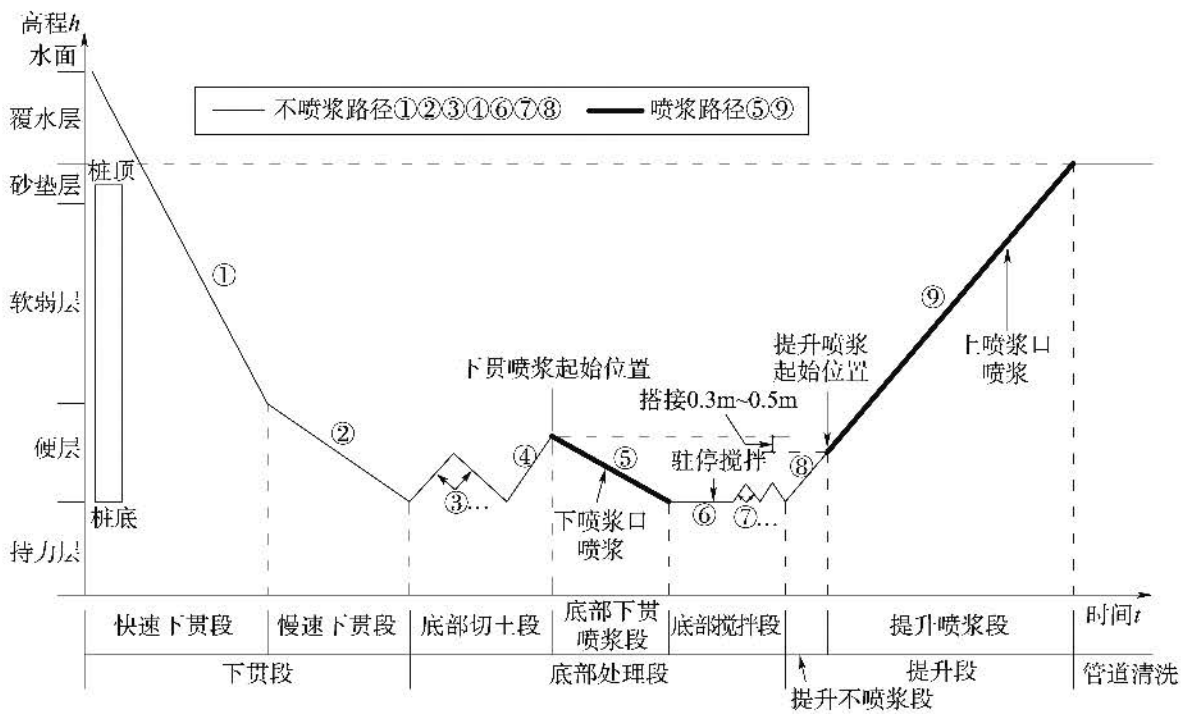


图 5.5 提升喷浆典型搅拌路径曲线

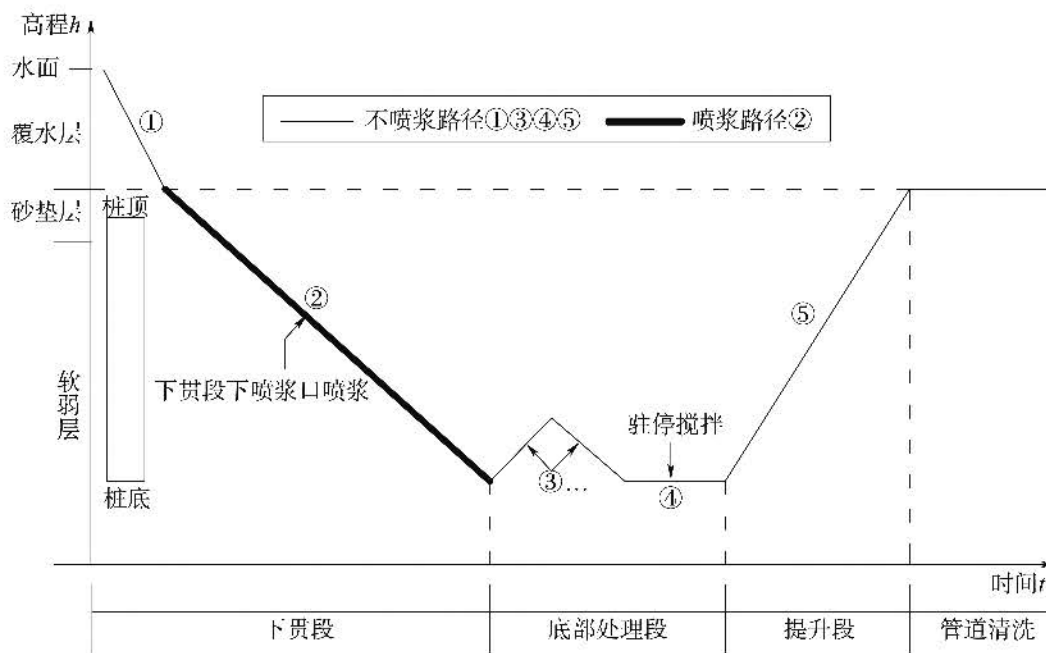


图 5.6 下贯喷浆典型搅拌路径曲线

5.4.15 根据勘察资料、施工记录的原始数据,能够对每个检测结果进行溯源,建立“勘察-施工-检测”全过程主要参数之间的对应关系。再结合不同深度的土层划分,针对不同土层类型,计算关键工艺参数与检测结果之间的皮尔逊相关系数,即可得到对于该工程区域,影响不同土层成桩质量的主要影响因素及其正负相关性,进而为优化不同深度、不同土层的施工工艺提供依据。

对某工程,按不同土层类型划分,根据原始数据,溯源不同检测结果对应的施工工艺参数,再统计不同土层主要工艺参数与无侧限抗压强度的皮尔逊相关系数,统计结果如表 5.1 所示。

表 5.1 某工程不同土层主要参数与无侧限抗压强度的皮尔逊相关系数统计表

土体类别	深度 (m)	样本数	主要参数与无侧限抗压强度的皮尔逊相关系数					不合格比例 (以百分数计)
			上覆土压力	龄期	水泥掺量	BRN	喷水量	
淤泥	1~6	165	0.602	0.311	0.217	0.160	0.013	13.3
	7~11	140	0.244	0.049	0.323	0.429	-0.159	0.7
淤泥质黏土	1~7	40	0.608	-0.037	0.164	0.283	-0.431	2.5
	8~19	113	-0.603	-0.206	-0.152	-0.165	-0.241	8.0
	>20	121	-0.271	0.250	0.233	-0.176	-0.352	21.5
黏土	10~14	143	-0.085	0.073	0.135	0.224	0.048	7.0
	15~19	110	0.114	-0.130	-0.186	0.585	0.307	7.3

由表 5.1 可知,在该工程中,对于浅表层淤泥(1m~6m)水泥掺量与无侧限抗压强度弱相关,BRN 与无侧限抗压强度无相关。主要是因为浅表层淤泥含水率高、液性指数高、流动性强,施工时易搅拌均匀、水泥浆易散失,故加大水泥掺量或提高 BRN,对提高水泥土无侧限抗压强度均不明显。同时,土压力与无侧限抗压强度呈强正相关关系,因此,可以通过铺砂垫层提高土压力的方式来提高浅层淤泥的成桩质量。对于中层淤泥(7m~11m),BRN 与无侧限抗压强度呈中等程度正相关关系,水泥掺量与无侧限抗压强度呈弱正相关关系,可以通过提高水泥掺量、BRN 的方式来提高中层淤泥(7m~11m)成桩质量。

5.4.16 桩簇搭接施工时间间隔超过 3d 时,水泥土已具备一定的强度,此后再进行下贯施工将会异常困难,因此需要在搭接处预先实施不喷水、不喷浆的下贯和搅拌,以便为后续搭接施工创造条件。

6 质量检验

6.3 检验方法

6.3.1 水下深层水泥搅拌桩的直径显著大于陆上水泥搅拌桩,导致在相同处理面积的情况,水下深层水泥搅拌桩的桩数明显小于陆上水泥搅拌桩,因此在行业标准《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237—2017)检测频次的基础上增加了钻芯法的抽检频次。同时,水下深层水泥搅拌桩的取芯成本也显著高于陆上水泥搅拌桩,因此,对桩簇无侧限抗压强度芯样试件数量按每米截取 1 个试样,以充分利用钻孔取芯的芯样。

6.3.5.1 水下载荷板试验采用锚桩法时,需要解决以下关键问题:

(1) 为保证传力杆能将上部施加载荷准确地传递至载荷板,传力杆与锚桩及基准桩之间不能相互连接,试验平台的整体稳定性需经过科学论证;

(2) 需采取措施,有效控制试验过程中传力杆受风、浪、流等影响,尤其是在复杂水域条件下;

(3) 合理设计载荷板的尺寸与刚度,保证在传力杆集中荷载作用下扩散至载荷板底部的应力分布均匀;

(4) 载荷板平面尺寸与桩簇单元面积以及加固布置形式密切相关。

6.3.5.6 行业标准《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237—2017)规定“载荷试验的试坑或试井底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小应小于 2m”。行业标准《水下挤密砂桩施工质量检测标准》(JTS 261—2019)规定“基准桩与锚桩的间距不应小于锚桩直径的 3 倍。基准桩与承压板边间距不应小于承压板直径或宽度,且不应小于 3m”。考虑水下载荷板尺寸较大、试验易受水流影响以及各标准的主要应用场景等因素,因此作出本款规定。

6.3.5.8 行业标准《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237—2017)规定“当一小时内沉降量小于 0.1mm 时,即可加下一级荷载”。行业标准《水下挤密砂桩施工质量检测标准》(JTS 261—2019)规定“承压板沉降相对稳定标准宜采用每小时沉降量不大于 0.25mm”,由于砂桩为散体桩,试验中相对水泥土桩这种半刚性桩更难稳定,因此作出本款规定。

6.4 质量评价

6.4.5 水下深层水泥搅拌桩作为复合地基,结合概率思想,考虑检测结果的不均匀程度进行综合评价相对更科学合理。系数 K 与不合格置信度的关系如图 6.1 所示,例如当系数 K 取 1.0 时,深层水泥搅拌桩的不合格置信度为 15.9%,合格置信度为 84.1%。

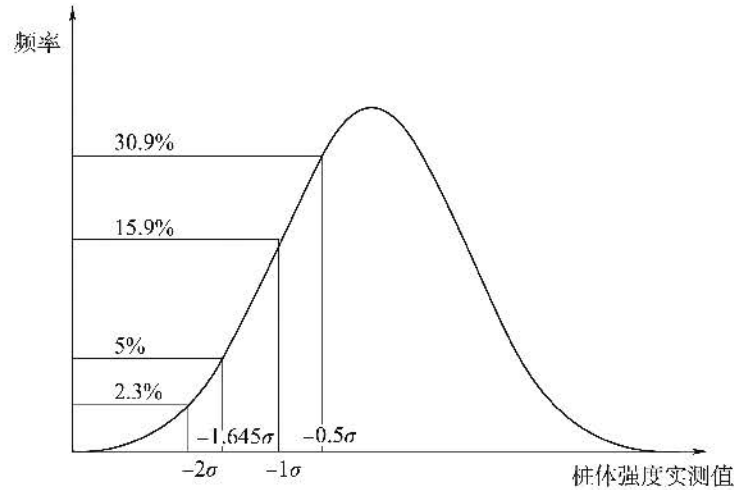
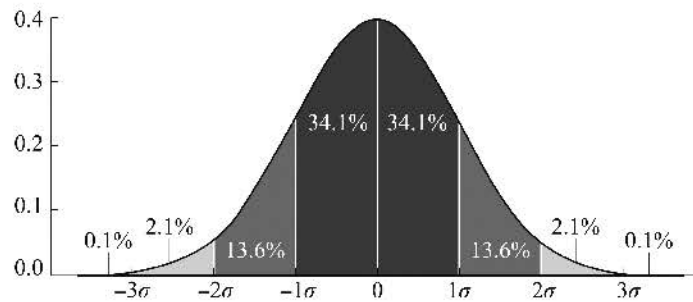


图 6.1 桩体实测强度频率统计分布曲线

系数 K 取值表中的 5 个取值,是在正态分布 3σ 准则的基础上内插了 1.645(对应 95% 置信度)和 0.5。正态分布的 3σ 准则,是指 $P(\mu - \sigma < X \leq \mu + \sigma) = 68.2\%$, $P(\mu - 2\sigma < X \leq \mu + 2\sigma) = 95.4\%$, $P(\mu - 3\sigma < X \leq \mu + 3\sigma) = 99.7\%$,如图 6.2 所示。

图 6.2 正态分布的 3σ 准则

基于概率统计理论对某大型工程的检测结果进行施工质量评价,结合检测区域,按区域的平面位置,按小区域进行合并作为评价对象,各区域的主要检测信息如表 6.1 所示。

表 6.1 各区域的主要检测信息

邻近区域合并	施工区域	施工桩数	检测桩数	抽检率 (%)	无侧限抗压强度样本数	平均值 (MPa)	标准差 (MPa)
A 区	T1、T2	448	3	0.7	42	3.59	1.63
B 区	T4、T5	450	3	0.7	26	4.40	1.54
C 区	T20、T21	360	2	0.6	17	3.06	1.58
D 区	S5	182	4	2.2	120	2.82	1.12
E 区	S14、S15	822	5	0.6	166	2.91	1.11
F 区	S16、S17	898	7	0.8	320	2.26	0.98
G 区	L15、L16、L17	288	7	2.4	72	3.45	1.17
H 区	L34、L35、L36	254	4	1.6	43	3.07	1.08
I 区	LB11、LB14、LB16	378	4	1.1	37	3.65	1.54

大量实际工程的水泥土强度统计数据表明,现场水泥土芯样强度近似服从正态分布。统计学中应用最广泛的非参数检验法主要有卡方检验和 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 检验。K-S 检验法不需要区间划分,相比于卡方检验其更适用于小样本数据。为验证研究对象是否服从正态分布,采用 K-S 检验数据样本。

K-S 检验是基于累计分布函数,用以检验一个经验分布是否符合某种理论分布或比较两个经验分布是否有显著性差异的方法。其基本思路为:通过将样本观测值的累积频率 $F_n(x)$ 与不同的假设理论概率分布 $F_X(x)$ 进行比对分析,从而确定累积频率的概率分布类型。

由表 6.2 检验结果可知,各区域渐进显著性(双尾)均大于 0.05,因此接受原假设,各区域的无侧限抗压强度值服从正态分布,典型区域的分布图如图 6.3 所示。

表 6.2 各区域的 K-S 检验结果

区域	A 区	B 区	C 区	D 区	E 区	F 区	G 区	H 区	I 区	
个案数	42	26	17	120	166	320	72	43	37	
正态参数	平均值	3.59	4.40	3.06	2.82	2.91	2.26	3.45	3.07	3.65
	标准偏差	1.63	1.54	1.58	1.12	1.11	0.98	1.17	1.08	1.54
渐近显著性(双尾)	0.20	0.20	0.15	0.20	0.10	0.20	0.05	0.20	0.20	

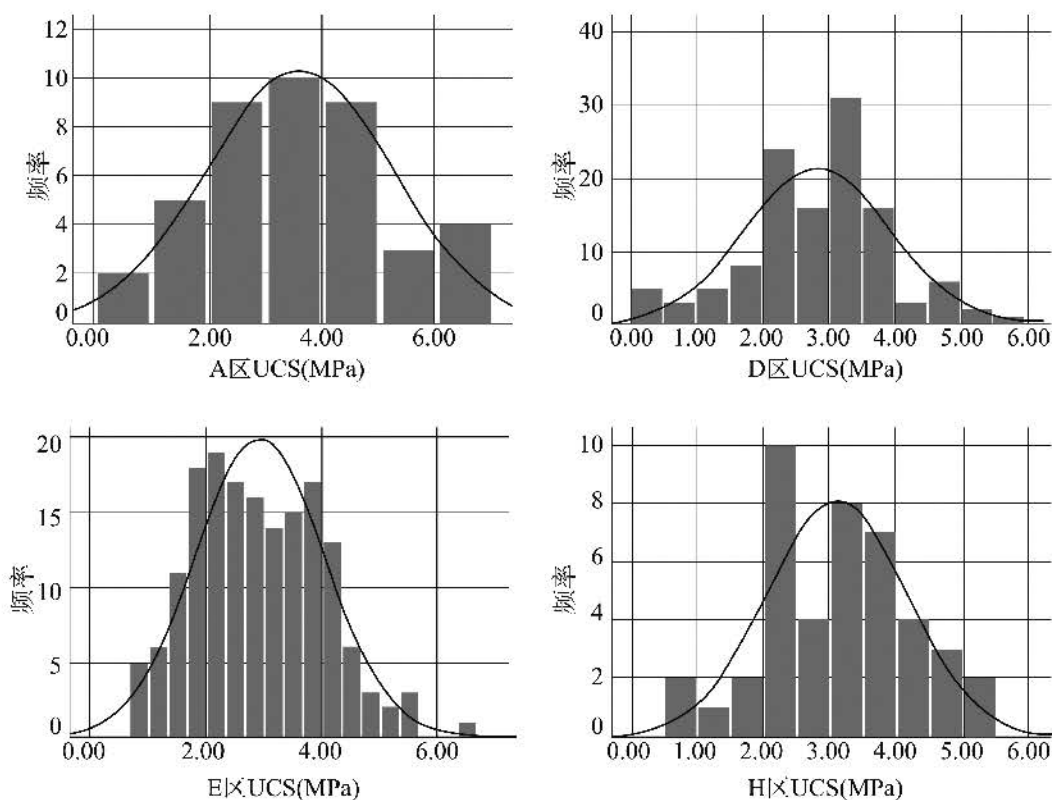


图 6.3 典型区域的频率分布及拟合曲线

该项目 DCM 桩设计强度为 1.2MPa,各区域的不同置信度对应强度如表 6.3 所示。

表 6.3 各区域不同置信度对应强度

邻近区域 合并	施工区域	无侧限抗压 强度样本数	平均值 (MPa)	标准差 (MPa)	不同置信度对应强度(MPa)			
					84.1%	90.0%	95.0%	97.7%
A区	T1、T2	42	3.59	1.63	1.96	1.50	0.91	0.33
B区	T4、T5	26	4.40	1.54	2.86	2.43	1.87	1.32
C区	T20、T21	17	3.06	1.58	1.48	1.04	0.46	-0.10
D区	S5	120	2.82	1.12	1.70	1.39	0.98	0.58
E区	S14、S15	166	2.91	1.11	1.80	1.49	1.08	0.69
F区	S16、S17	320	2.26	0.98	1.28	1.01	0.65	0.30
G区	L15、L16、L17	72	3.45	1.17	2.28	1.95	1.53	1.11
H区	L34、L35、L36	43	3.07	1.08	1.99	1.69	1.29	0.91
I区	LB11、LB14、LB16	37	3.65	1.54	2.11	1.68	1.12	0.57

由上表可知,该项目各施工区域,检测强度值大于设计强度的置信度均超过 84.1%。同时,B区置信度超过 97.7%,G区、H区置信度超过 95%,A区、D区、E区和I区置信度超过 90%。

基于概率统计理论对水下 DCM 桩进行施工质量评价,更符合水下 DCM 复合地基整体稳定性的设计原理。可以有效避免因个别桩施工质量不合格,影响对水下 DCM 复合地基整体稳定性的合格判定,能有效定量反映复合地基的整体施工质量。

附录 C 皮尔逊相关系数计算方法

C.0.1 皮尔逊相关系数的变化范围为 -1 到 1 , 不同范围代表着 X 和 Y 正相关关系不同, 如表 C.1 所示。

表 C.1 皮尔逊相关系数值及其相关性对应表

序号	皮尔逊相关系数 r	相关性
1	大于 0 小于 1	X 和 Y 正相关关系
2	小于 0 大于 -1	X 和 Y 负相关关系
3	等于 1	X 和 Y 完全正相关
4	等于 -1	X 和 Y 完全负相关
5	等于 0	X 和 Y 不相关
6	绝对值在 $0.8 \sim 1.0$ 之间	X 和 Y 极强相关
7	绝对值在 $0.6 \sim 0.8$ 之间	X 和 Y 强相关
8	绝对值在 $0.4 \sim 0.6$ 之间	X 和 Y 中等程度相关
9	绝对值在 $0.2 \sim 0.4$ 之间	X 和 Y 弱相关
10	绝对值在 $0.0 \sim 0.2$ 之间	X 和 Y 极弱相关或无相关