水利水电工程软土地基处理施工技术

刘晓明

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司　四川　成都　610000

摘　要：软土地基是水利水电工程施工中的重点难点，由淤泥、淤泥质土等组成，具备高含水量、低承载力等鲜明特性，易引发工程结构沉降、渗漏等问题。为保障工程稳定性，需结合地基地质条件选择合适处理技术，主要分为物理、化学、结构及复合四大类。各类技术依托不同原理发挥作用，通过优化施工工艺、控制关键要点，可有效改善软土地基工程性能、提升承载力。合理选用单一或复合处理技术，能解决软土地基变形隐患，保障水利水电工程长期安全稳定运行，为工程施工提供可靠技术支撑。

关键词：水利水电工程；软土地基；施工技术；排水固结；高压喷射注浆

引言：水利水电工程建设质量直接关系到水资源调控、防洪减灾等重大民生需求，而地基工程作为工程建设的基础，其稳定性决定整体工程质量。软土地基在水利水电工程中较为常见，受形成环境影响，其特殊工程特性易导致施工过程中出现地基失稳、结构沉降等问题，严重影响工程安全与使用寿命。因此，深入分析软土地基的工程特性，探索科学合理的处理技术，明确各类技术的施工要点与适用场景，对解决软土地基处理难题、提升工程施工质量具有重要意义，下文将围绕相关内容展开详细阐述。

1 水利水电工程软土地基的工程特性

水利水电工程中的软土地基，主要由淤泥、淤泥质土、泥炭土及冲填土等组成，其形成与地下水活动、沉积环境密切相关，具备鲜明的工程特性，直接决定了处理技术的选择和施工方案的制定。软土地基最核心的特性是高含水量，土体含水量普遍高于塑限，部分甚至接近液限，导致土体颗粒间联结力微弱，结构松散，无法承受较大荷载。同时，软土地基具有低承载力特征，天然孔隙比大，土颗粒排列紊乱，抗剪强度极低，在水利水电工程的上部荷载作用下，易发生剪切破坏，引发工程结构沉降。

此外，软土地基的高压缩性的显著特点，受荷载作用后，土体颗粒会快速挤压、孔隙体积缩小，产生较大的沉降量，且沉降持续时间长，若处理不当，会导致工程结构出现不均匀沉降，引发裂缝、渗漏等问题。软土地基还具有强触变性和低渗透性，受到施工扰动后，土体结构易被破坏，强度急剧下降，且水分难以排出，进一步加剧地基变形。这些特性相互影响、相互作用，使得软土地基处理成为水利水电工程施工中的重点和难点，需结合具体地质条件，针对性选择处理技术[1]。

2 水利水电工程软土地基处理核心技术分类

2.1 物理处理技术

物理处理技术是通过物理手段改变软土地基的土体结构、密度和含水量，从而提升地基承载力和稳定性，具有施工简便、成本较低、环保性好的优势，在浅层软土地基处理中应用广泛。其核心原理是通过置换、振密、挤密或排水等方式，减少土体孔隙率，增强土颗粒间的联结力，改善地基的工程性能。常见的物理处理技术包括换填垫层法、振密挤密法、排水固结法等，不同技术的适用场景和施工要点存在差异，需根据地基厚度、含水量等参数合理选择。

2.2 化学处理技术

化学处理技术是向软土地基中注入化学材料，通过化学反应改变土体的物理力学性质，形成强度较高的复合土体，从而提升地基承载力，适用于深层软土地基或物理处理效果不佳的场景。其核心机理是利用化学材料与土体颗粒发生胶结、固化反应，填充土体孔隙，增强土颗粒间的黏结力，降低土体含水量和压缩性。常用的化学处理材料包括水泥、石灰、粉煤灰及各类化学固化剂，不同材料的固化效果和适用条件不同，需结合地基土质合理配比使用。

2.3 结构处理技术

结构处理技术是通过在软土地基中设置刚性或柔性结构，将上部荷载传递至深层坚硬土层，绕过软弱土层，从而避免软土地基因荷载作用产生过大变形，适用

于荷载较大、沉降要求严格的水利水电工程。这类技术的核心是利用结构的承载能力，分散上部荷载，减少软土地基的受力，保障工程结构的稳定性。常见的结构处理技术包括桩基法、高压喷射注浆法、防渗墙法等，这类技术施工精度要求较高，需严格控制施工工艺，确保结构与土体的结合效果[2]。

2.4 复合处理技术

复合处理技术是结合两种或两种以上单一处理技术的优势，针对复杂软土地基地质条件，制定协同处理方案，实现优势互补，提升处理效果。由于水利水电工程软土地基地质条件往往较为复杂，单一处理技术难以满足工程要求，复合处理技术通过合理组合物理、化学或结构处理技术，既能改善软土地基的工程特性，又能提升地基的承载能力和抗变形能力，降低施工成本和工期。常见的复合处理技术包括排水固结 + 化学固化复合技术、换填垫层 + 桩基复合技术等，需根据地基具体情况优化组合方案。

3 水利水电工程软土地基核心施工技术详解

3.1 换填垫层法施工技术

换填垫层法是水利水电工程浅层软土地基处理中最常用的物理处理技术，适用于软土层厚度 ≤ 3 米、承载力要求不高的区域（如堤坝基础、渠道边坡）。其核心是挖除基础底面范围内全部或部分软弱土体，回填强度高、稳定性好、渗透性适宜的材料，分层压实形成新地基垫层，以此提升承载力、消除变形隐患。

施工前需勘察软土地基，明确软土层厚度、分布、含水量及承载力等参数，确定换填深度和材料。常用换填材料有级配砂石、灰土、素混凝土等，其中级配砂石因取材方便、成本低，应用最广泛。

施工时，先开挖软弱土体，严格按设计控制深度，避免超挖、欠挖，同时做好排水防地下水浸泡基坑。开挖完成后分层铺设换填材料，每层厚度 20-30 厘米，铺设后用压路机、打夯机压实，压实系数需符合设计要求，实时检测压实效果，不达标则重新铺设压实。换填垫层顶面需平整，与上部结构基础紧密结合，避免空隙影响荷载传递。该技术施工简便、见效快，但处理深度有限，不适用于深层软土地基[3]。

3.2 排水固结法施工技术

排水固结法利用软土地基渗透性，通过设置排水系统排出土体水分、加速固结，提升地基承载力和抗变形能力，适用于含水量高、压缩性大、渗透性差的软土地基（如淤泥、淤泥质土），广泛应用于堤坝、水库大坝等部位。其核心是通过排水系统降低土体孔隙水压力，使土颗粒压实、增强联结力，改善工程性能。该技术主要分为堆载预压法和真空预压法，核心原理一致，施工工艺略有不同。

堆载预压法施工包括排水系统设置、堆载施加、固结观测三个环节。排水系统由竖向排水体（塑料排水板、砂井）和水平排水体（砂垫层）组成，施工时先在地基表面铺设砂垫层，再打设穿透软土层至下卧坚硬土层的竖向排水体。随后分层施加堆载（砂石、土料等），根据地基承载力逐步增加厚度，避免一次性堆载过大导致失稳，同时实时观测沉降量和孔隙水压力，调整堆载速度和用量。

真空预压法无需堆载，通过在砂垫层上铺设密封膜，用真空泵抽取膜内空气形成真空负压，迫使土体排水固结。其关键是保证密封膜无破损、无漏气，施工中实时监测真空度、沉降量和孔隙水压力，确保真空度符合设计要求，直至地基固结达标。该技术处理效果稳定、适用于大面积地基，但施工周期较长，需合理安排进度。

3.3 振密挤密法施工技术

振密挤密法通过振动、冲击或挤压等机械作用力，缩减土体孔隙占比，促使土颗粒重新排布嵌合，提升密实度、抗剪承载力，降低后期沉降风险，适用于松散砂土、粉土、粉质黏土及杂填土等软土地基，多用于地基加固、边坡防护。按施工方式可分为振冲挤密法、强夯法、夯实挤密法等，其中强夯法和振冲挤密法应用最广泛。

振冲挤密法施工包括定位、造孔、振冲、填料四个环节。施工前根据勘察资料确定振冲点布置（等边三角形或正方形）、间距和深度。施工时将振冲器定位在振冲点，启动后利用振动冲击力造孔至设计深度，造孔中持续注入清水冷却振冲器、排出土体颗粒；造孔完成后，分层填入砂石、碎石等填料（每层 30-50 厘米），振冲器反复振动，使填料与周边土体紧密结合形成密实桩体，提升地基承载力。

强夯法核心是利用重锤自由下落的冲击力夯实地基，提升承载力。施工前确定重锤重量（10-60 吨）、落距、夯击次数和夯点布置，清理平整场地后，将重锤起吊至预定高度自由下落，按设计次数夯击每个夯点，实时测量夯沉量确保效果；夯击完成后填平夯坑，两遍夯击间隔时间根据土中超静孔隙水压力消散情况确定，黏性土地基间隔不少于 2-3 周。该技术施工效率高、处理

深度大，但振动和噪音较大，需控制施工范围避免扰动周边土体。振密挤密法的关键是控制施工参数，确保土体密实度达标[4]。

3.4 高压喷射注浆法施工技术

高压喷射注浆法是集化学固化与结构加固于一体的技术，适用于淤泥、淤泥质土、黏性土、粉土、砂土等各类软土地基，尤其适用于深层和复杂地质条件下的地基处理，广泛应用于防渗加固、地基补强。其核心原理是利用高压射流将水泥浆液或化学浆液喷射至软土地基，冲击破坏土体，使浆液与土颗粒充分混合胶结，形成高强度固结体，提升承载力和抗渗能力。

该技术按喷射方式分为旋喷（圆柱状固结体）、定喷（壁状固结体）、摆喷（扇状固结体），可根据工程需求选择。施工流程包括钻机就位、钻孔、置入注浆管、高压喷射注浆、拔出注浆管五个环节。施工前根据勘察资料确定喷射压力（20-30MPa）、提升速度（40-80mm/min）、旋转速度（6-8r/min）、浆液配比等参数。

施工时，钻机就位并调整垂直度，钻孔至设计加固深度，做好泥浆护壁防孔壁坍塌；将带喷头的注浆管置入预定深度，启动高压注浆泵喷射浆液，同时控制注浆管提升和旋转速度，确保浆液与土体充分混合；实时观察喷射情况和冒浆量，及时调整参数。注浆完成后及时拔出注浆管，清洗机具和孔口。浆液配比至关重要，水灰比宜为 0.8-1.0，确保流动性和固化效果；土中含大量大粒径块石、坚硬黏性土或植物根茎时，需通过现场试验确定适用性。该技术加固深度大、效果好，但施工精度要求高，需严格控制参数。

3.5 复合处理技术施工要点

复合处理技术针对复杂软土地基，结合两种及以上单一技术优势实现协同加固，适用于软土层厚、含水量高、承载力要求严格的工程（如大型水库大坝、引水枢纽）。其核心是根据地基特性优化技术组合，互补优势，解决沉降问题、提升承载力和抗渗能力，同时降低成本和工期。常见复合技术有排水固结 + 化学固化、换填垫层 + 桩基、高压喷射注浆 + 振密挤密等。

排水固结 + 化学固化复合技术，在排水固结基础上注入化学固化剂，加速固结、提升土体强度，适用于极高含水量、极差渗透性软土地基。施工要点是先设置排水系统排出部分水分，再注入固化剂，确保混合充分、提升效果。

换填垫层 + 桩基复合技术，浅层用换填垫层法、深层用桩基法，通过垫层分散上部荷载，桩基将荷载传递至深层坚硬土层，适用于软土层厚、上部荷载大的部位。施工时先完成换填垫层并确保密实，再进行桩基施工，严格控制桩位、桩长和桩身质量，确保桩基与垫层紧密结合、有效传递荷载。

高压喷射注浆 + 振密挤密复合技术，先采用振密挤密法初步加固、改善土体密实度，再用高压喷射注浆法深层加固形成复合固结体，适用于复杂地质地基。施工时合理控制两种技术的顺序和参数，振密挤密后等待土体稳定，再进行高压喷射注浆，保障协同效果。

复合处理技术的关键是优化方案设计，结合勘察资料明确各技术适用范围和要点，合理组合避免冲突；施工中加强质量控制，实时监测地基沉降、承载力等参数，及时调整方案，保障工程质量[5]。

结束语： 软土地基处理是水利水电工程施工的核心环节，直接关系工程安全、稳定与耐久性。结合其高含水量、低承载力等特性，合理划分处理技术类型、明确各类技术要点，是解决地基难题的关键。单一技术各有侧重，复合技术可实现优势互补，更适配复杂地质。施工中需结合勘察结果优化方案、严控质量，确保技术实效。未来需持续优化施工工艺，推动技术向高效、环保、经济方向发展，为水利水电工程高质量建设提供保障。

参考文献

[1] 刘晓亚, 肖骏. 软土地基处理技术在水利工程施工中的应用研究 [J]. 水上安全,2026(1):163-165.

[2] 张旭林. 水利水电工程施工中软土地基处理技术分析 [J]. 科技资讯,2025,23(8):163-165.

[3] 崔天放. 水利工程中土坝软土地基施工处理措施 [J]. 区域治理,2026(6):0148-0150.

[4] 郭道迁, 于志多. 水利工程中软土地基处理技术的比选与应用实例 [J]. 水上安全,2026(1):151-153.

[5] 赵杨. 水利工程施工中软土地基处理技术 [J]. 云南水力发电,2025,41(1):170-172.