

水利工程软土地基勘察及处理技术

汪勇

长江岩土工程有限公司, 湖北武汉, 340010;

摘要: 软土地基是水利工程建设中常见的不良地质条件, 其强度低、压缩性高、透水性差、稳定性弱等特性, 严重威胁工程安全与长期稳定运行。本文系统阐述了软土地基的基本概念与工程特性, 重点分析了在水利工程施工中因软土地基引发的承载力不足、沉降变形、稳定性差等关键问题。在此基础上, 详细论述了适用于水利工程的桩基处理、土质换填、淤泥处理、预压技术及排水固结等关键处理技术的原理、适用条件与实施要点。文章强调, 在“双碳”目标与生态文明建设背景下, 现代软土地基处理技术正朝着绿色、高效、智能化与全生命周期精细化管理的方向发展。科学的勘察、合理的方案选择与规范的施工是确保水利工程在软土地基上安全、经济、耐久建设的根本保障。

关键词: 水利工程; 软土地基; 地基勘察; 地基处理技术; 沉降控制; 生态友好

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.066

引言

水利工程作为国民经济的重要基础设施, 承担着防洪排涝、水资源配置、水力发电、农业灌溉、航运交通等多重使命。其建筑物如大坝、水闸、泵站、堤防、渠道等, 对地基的稳定性、承载力和变形控制要求极为严格。然而, 我国沿海、沿江、沿湖及三角洲等广大地区广泛分布着深厚的软土层, 其主要由淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土及其他高压缩性土构成。这类软土地基天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低、渗透性差, 且在动力荷载下易发生触变与流变, 构成了水利工程建设中的主要地质挑战。

在软土地基上修建水利工程, 若勘察不详、处理不当, 极易导致构筑物基础失稳、过量沉降或不均匀沉降、边坡滑塌、渗流破坏等事故, 轻则影响工程效益, 重则引发溃坝、决堤等灾难性后果, 造成巨大生命财产损失。例如, 历史上一些水利工程因地基问题导致的闸底板断裂、堤防滑坡、泵站倾斜等案例, 至今仍具警示意义。因此, 深入系统地研究软土地基的工程特性, 发展并精准应用相适应的勘察与处理技术, 对于保障水利工程的安全建设与长效运行具有至关重要的理论价值和现实意义。

本文旨在结合水利工程特点, 梳理软土地基的基本概念与常见问题, 重点探讨当前主流处理技术的原理与应用, 并对技术发展趋势进行展望, 以期对相关工程实践提供参考。

1 软土地基概念

软土并非一种具体的土类名称, 而是指在静水或缓

慢流水环境中沉积, 经生物化学作用形成的, 天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、强度低、渗透性差, 并常含有有机质的细粒土。从工程地质学角度, 软土主要指:

淤泥及淤泥质土: 在静水或缓流环境中沉积, 天然含水量大于液限 ($w > w_L$), 天然孔隙比常大于 1.0 ($e > 1.0$), 富含有机质, 具有显著的结构性。

冲填土: 由水力冲填方式形成的人工地基土, 成分复杂, 多呈欠固结状态。

杂填土: 由建筑垃圾、工业废料或生活垃圾等混杂堆积而成, 成分不均, 性质离散性大。

此外, 软土还包括泥炭土, 这类土主要由未完全分解的植物残体堆积而成, 有机质含量极高, 天然孔隙比通常大于 1.5, 压缩性极强且承载力极低, 在水利工程建设中需特别注意其工程特性带来的潜在风险。这些不同类型的软土在水利工程场地中可能单独存在, 也可能以混合层的形式分布, 其工程性质的差异直接影响着地基处理方案的选择与实施效果。

其他高压缩性饱和黏性土。

其核心工程特性可概括为“三高一低”: 高含水量、高孔隙比、高压缩性、低强度 (抗剪强度低、承载力低)。此外, 还具有显著的流变性 (在荷载长期作用下变形持续发展)、触变性 (结构受扰动后强度急剧降低, 静置后可部分恢复) 以及低渗透性。这些特性使得软土地基在荷载作用下, 沉降量大、沉降稳定时间长, 且容易发生局部或整体剪切破坏, 是水利工程地基处理的重点与难点对象。

2 工程施工中软土地基常见的问题

在水利工程施工及运营期间, 软土地基的不良工程

特性会引发一系列严峻问题。

2.1 地基抗压能力低，导致承载物失稳

软土地基的抗剪强度和承载力远低于常规土体。水利工程构筑物如大坝、水闸、泵房等自重巨大，且承受水压力、土压力等复杂荷载。当地基承载力不足以支撑上部结构荷载时，地基土体可能发生整体剪切破坏，导致基础急剧下沉、倾斜，甚至引发建筑物整体倾覆或滑移。堤防工程中，软基段堤身填筑过程中就可能因地基承载力不足而发生堤脚隆起、堤身开裂乃至整体滑塌。

2.2 土质含水量高，影响工程建设质量

高含水量是软土的标志性特征。在施工期间，高含水量导致土体呈流塑至软塑状态，机械设备难以进入作业面，或陷入土中，施工效率低下。进行基坑开挖时，坑壁极易失稳、坍塌。进行填筑作业（如堤坝填筑）时，与软基接触面处理困难，易形成软弱夹层，成为潜在滑动面。此外，高含水量土体在冬季易发生冻胀，春季融化后承载力进一步降低，对季节性施工地区的工程质量和安全构成威胁。

2.3 软土地基不均匀性沉降，危及工程整体稳固

由于软土层厚度、组成、状态在水平方向上往往变化较大（不均匀性），加之水利工程结构荷载分布不均（如闸室与翼墙、泵房与进出水池），极易引发地基的不均匀沉降。过大的不均匀沉降会导致水闸闸墩倾斜、闸门启闭困难；导致泵站机组轴线偏移，运行振动加剧；导致渡槽、涵管等连接结构断裂、止水失效，引发渗漏。不均匀沉降是造成水利混凝土结构开裂、设备运行故障最常见的原因之一，严重影响工程正常使用功能和耐久性。

2.4 土质使用中抗剪度降低，引发涉水事故

软土，特别是饱和软黏土，其结构强度对扰动极为敏感。施工活动（如打桩、开挖、堆载）或运营期水位骤降、地震等动力作用，会破坏土体原有结构，导致其抗剪强度显著降低（触变）。在涉水边坡工程中，如水库岸坡、渠道边坡、堤防迎水坡，这种强度软化可能诱发滑坡。在挡水建筑物（如土石坝）下游坡脚，若软基处理不当，在高水位渗透压力作用下，可能发生地基土的渗透变形甚至整体失稳。运营期的长期渗流也可能在软基中形成渗流通道，危及工程安全。

3 工程施工中软土地基处理技术应用

针对上述问题，必须在水利工程施工前及施工中，采取有效的地基处理技术，以改善软土地基的工程性质，

满足工程对承载力、变形和稳定性的要求。技术选择需综合考虑土层条件、工程要求、施工环境、工期成本及环境影响等因素。

3.1 桩基处理技术

桩基是处理深厚软土地基最直接有效的方法之一，通过桩体将上部荷载传递至下卧硬土层或岩层，或利用桩侧摩阻力承担荷载。

原理与类型：主要包括预制桩（混凝土方桩、管桩）、灌注桩（钻孔、旋挖）和复合地基增强体（水泥土搅拌桩、CFG桩等）。在水利工程中，桩基常用于水闸、泵房、桥梁等对沉降控制要求高的集中荷载构筑物。

应用要点：需精确勘察软土层厚度与下卧层性质，合理确定桩长、桩径和桩距。注意软土中沉桩的挤土效应可能对邻近建筑物和已施工桩体造成不利影响，需采取跳打、预钻孔等措施。灌注桩需严格控制成孔质量和混凝土浇筑工艺，防止缩颈、断桩。桩基设计需与承台（底板）协同工作，考虑负摩阻力（如地面大面积堆载或水位下降引起软土固结下沉时）的影响。

3.2 土质换填技术

当软土层厚度较薄（一般小于3m）且埋深较浅时，可采用换填法。

原理与施工：将基础底面以下一定范围内的软弱土层挖除，换填为强度高、压缩性低、性能稳定的材料，如级配良好的砂石、碎石、灰土、矿渣或素混凝土等，分层压实。

应用要点：在水利工程中，常用于小型水工建筑物基础、堤防软基浅层处理、基坑回填等。换填层可起到应力扩散、提高承载力、减少沉降的作用。关键是要确定合理的换填深度和范围，并严格控制换填材料的质量、分层厚度和压实度。对于地下水位较高的地区，需做好基坑排水，防止坑底土体扰动和软化。

3.3 淤泥处理技术

专门针对含水量极高、呈流塑状态的淤泥质软土。

原理与方法：目标是快速降低含水量，提高强度。常用方法包括：

物理排水法：通过开挖排水沟、设置轻型井点或表面覆盖吸水材料（如砂垫层结合土工布）进行排水疏干。

化学固化法：向淤泥中掺入水泥、石灰等固化材料，通过搅拌形成水泥土或石灰土，利用固化反应提高土体强度。深层水泥搅拌桩（DCM）即属此类，广泛应用于堤防、围堰等线性工程的地基处理。

真空预压结合排水板法：对大面积超软淤泥地基尤

为有效（见3.5节）。

应用要点：需评估淤泥的有机质含量和pH值，因其可能影响固化效果。施工中需注意环境保护，防止泥浆污染。

3.4 预压技术

通过预加荷载，使软土地基在施工前期完成大部分沉降，从而提高地基强度。

堆载预压：在建筑场地预先堆填土石方等重物，待地基沉降稳定后卸除，再进行主体工程施工。此法简单直接，但荷载大、工期长，需要大量的预压材料和场地。

真空预压：在地面铺设密封膜，通过抽真空在膜下形成负压，相当于施加一个均匀的约80kPa的等效荷载。此法荷载均匀，无需大量堆载材料，施工速度快，适用于大面积软基处理，常与排水系统（塑料排水板）结合使用，显著加速固结（即“排水固结”）。

3.5 排水固结技术

这是处理饱和软黏土地基的核心技术，常与预压法结合，构成“排水固结预压法”。

原理：在软土地基中设置竖向排水通道（如传统砂井或现代塑料排水板），缩短孔隙水的排出路径，再在地表施加预压荷载（堆载或真空），加速土中孔隙水压力消散，有效应力增加，从而使土体压密、固结，强度增长。

系统构成：

排水系统：竖向排水体（塑料排水板，其具有通水量大、施工便捷、对土体扰动小等优点）和水平排水垫层（砂垫层或土工复合材料垫层）。

加压系统：堆载或真空负压，或两者联合（真空-堆载联合预压）。

应用要点：广泛应用于水库土坝坝基、港口码头陆域形成、路基及堤防工程等。设计需根据土层条件、工期要求，合理确定排水板间距、深度、预压荷载大小和预压时间。施工中需进行严密监测（沉降、孔隙水压力、边桩位移等），实行信息化施工，控制加载速率，防止地基发生剪切破坏。

除了上述主要技术，其他如强夯法（适用于非饱和或稍湿的软弱土）、高压喷射注浆法、加筋土技术（土工格栅、土工织物等）等，在特定条件下的水利工程软基处理中也发挥着重要作用。

4 结语

水利工程软土地基的勘察与处理是一项综合性、系

统性的工程技术课题。面对软土地基带来的承载力、沉降与稳定性挑战，任何单一技术都非“万能钥匙”，成功的关键在于“对症下药”。

首先，精准勘察是前提。必须采用钻探、原位测试（静力触探、十字板剪切试验等）、室内试验相结合的手段，查明软土层的空间分布、物理力学指标和渗透特性，为处理方案设计提供可靠依据。

其次，方案比选与优化是核心。需紧密结合具体水利工程类型（坝、闸、堤、泵站）、荷载特点、安全等级、工期要求及造价约束，进行多方案技术经济比选。现代工程实践中，复合地基技术（如长短桩复合地基、桩-网复合地基）、多种技术联合应用（如排水固结+局部桩基）已成为处理复杂软基问题的主流方向。

再者，绿色智能是趋势。在生态文明建设背景下，地基处理技术需更加注重环境保护（如减少泥浆排放、采用可再生材料）、资源节约和能源消耗降低。同时，基于物联网、BIM和大数据的施工全过程智能化监控与反馈系统，可实现沉降预测、稳定性预警和工艺参数的动态优化，极大提升处理效果的可控性和工程安全性。

最后，全生命周期管理是保障。软土地基处理效果不仅关乎施工期安全，更影响工程数十甚至上百年的长期运行。必须建立从勘察、设计、施工到运营维护的全生命周期管理体系，持续监测地基性状变化，及时评估工程健康状况，防患于未然。

总之，水利工程软土地基处理技术的进步，是保障国家水安全、推动重大水利基础设施建设高质量发展的重要支撑。未来，随着新材料、新工艺、智能技术的深度融合，软土地基处理必将朝着更加安全、经济、环保、高效的方向持续发展。

参考文献

- [1] 简学兴. 水利工程中软土地基处理技术与要点管理[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (32): 190-192.
- [2] 王红东. 水利工程施工中软土地基处理技术应用分析[J]. 地下水, 2025, 47(05): 266-267+289.
- [3] 李雨才. 水利工程施工中软土地基处理技术的研究与应用[J]. 中国设备工程, 2025, (S2): 266-269.
- [4] 王浩, 耿玉芝, 李福. 水利工程施工中软土地基处理技术研究[J]. 水上安全, 2025, (09): 185-187.
- [5] 张腾, 王大伟. 浅谈水利工程施工中软土地基处理技术[J]. 治淮, 2025, (03): 49-50+67.