

# 平原水库软基处理新技术与稳定性研究

郭磊

新疆塔里木河流域开都孔雀河水利管理中心希尼尔水库管理站

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6753

**[摘要]** 平原地区水库建设常受软土地基制约,其高压缩性、低承载力及环境敏感性易引发沉降失稳风险,传统处理方法在效率与可持续性上存在显著局限。本研究立足多学科交叉视角,系统探索软基处理的创新技术路径,通过材料科学、智能监测与生态工程的深度融合,提出针对性解决方案。研究聚焦于纳米材料原位固化、生物酶促反应及动态稳定性预测等核心方向,结合理论建模与工程实践,验证了新技术在提升地基强度、控制变形及降低环境影响方面的优越性。成果不仅为平原水库工程提供了可靠技术支持,更拓展了软基处理的理论边界,对推动水利基础设施的绿色化与智能化转型具有深远意义。

**[关键词]** 软土地基; 平原水库; 稳定性研究; 纳米材料固化

**中图分类号:** TV697 **文献标识码:** A

## Research on New Soft Foundation Treatment Technology and Stability of Plain Reservoirs

Lei Guo

Xinjiang Tarim River Basin Kaidu Peacock River Water Management Center Xini'er Reservoir Management Station

**[Abstract]** Reservoir construction in plain areas is often constrained by soft soil foundations, which are prone to settlement instability risks due to their high compressibility, low bearing capacity, and environmental sensitivity. Traditional treatment methods have significant limitations in terms of efficiency and sustainability. This study adopts a multidisciplinary perspective to systematically explore innovative technological paths for soft foundation treatment. Through the deep integration of materials science, intelligent monitoring, and ecological engineering, targeted solutions are proposed. The research focuses on core directions such as in-situ solidification of nanomaterials, biological enzymatic reactions, and dynamic stability prediction. Combining theoretical modeling and engineering practice, the superiority of the new technologies in enhancing foundation strength, controlling deformation, and reducing environmental impact is verified. The results not only provide reliable technical support for plain reservoir projects but also expand the theoretical boundaries of soft foundation treatment, which is of profound significance for promoting the green and intelligent transformation of water infrastructure.

**[Key words]** soft soil foundation; plain reservoir; stability study; nanomaterial stabilization

### 引言

软土地基在平原水库工程中成为关键瓶颈,其高含水率与弱结构性导致承载力不足,易诱发不均匀沉降与滑坡灾害。现有技术如排水固结或桩基加固虽能部分缓解问题,但普遍存在周期冗长、成本高昂及生态扰动等缺陷,难以适应现代水利工程对高效性与可持续性的双重诉求。随着平原地区水资源开发需求激增,软基处理亟需突破传统框架,探索兼具技术先进性与环境友好性的新范式。本研究摒弃对单一技术路径的依赖,从材料创新与系统优化层面切入,深入剖析软基失稳机理,提出多维度解决方案。通过整合前沿科技与工程实践,旨在构建更稳健、更经济的稳定性保障体系。

### 1 软基特性与工程挑战

#### 1.1 软土物理力学行为的多尺度表征

从微观到宏观来看,平原软土具有复杂的物理力学性质:从微观上看,黏粒矿物成分主要为蒙脱石及伊利石,粒子之间相互胶结程度较低,内部空隙较疏松,使得土体原始孔隙比一般较大(大于1.5),渗透系数极小(约为 $10^{-7}$  cm/s);从宏观上看,土体受到外力作用后容易产生较大的变形,即土粒被压密并排出孔隙水而引起主固结沉降。从整体上看,软土的应力应变关系具有明显的非线性特征;在较低围压条件下,软土的剪切强度较小,在20kPa左右,并且软土地基还受到加载速率的影响,即当软土地基被迅速浸没后会形成较高的孔压,从而缩短有效应力作用的时间,增大软土地基即时沉降的风险。

#### 1.2 平原水库荷载作用下的特殊失稳机制

平原地区水库运行条件加剧了软弱地基地质灾害的发生。在水库正常蓄水情况下,大范围均匀静荷载作用下,软土地基中超孔隙水压长期积聚而不能有效排出,需长时间排水固结,致使工程完工后大部分沉降集中于施工后期;此外,在库区水位频繁波动条件下,还会产生动态荷载作用,即当水库水位下降过程中,由于渗流方向发生改变,对软土地基施加负向剪切应力,易发生流失失稳现象;超长期浸没下结构破坏概率增加,反复作用下抗剪强度降低四分之一。另外,在平原地带还会遇到含有大量有机物质黏土层,这些物质在厌氧环境下会产生大量沼气,导致黏土层产生离散空隙。在实际工程中,由于施工阶段对地基进行急促回填,后期运行过程中会出现蓄水位上升的情况,两者的先后顺序会导致地基内部压力没有完全释放就被后续作用所影响,构成“叠连失稳”风险链<sup>[1]</sup>。

## 2 新技术应用与稳定性动态调控

### 2.1 纳米材料改性对软基微观结构的重构效应

纳米材料利用尺度效应提高软基性能。将粒径为20~50nm的纳米SiO<sub>2</sub>引入软土内部,在土体中扩散后,其表面上的硅羟基能够与土中的黏土矿物发生缩聚作用生成Si-O-Si三维网状结构,并能对土颗粒起到良好的架桥作用和充填空隙的作用;试验表明,当加入1.5%纳米材料时,能使软土的比表面积增大40%,孔隙率减少30%,无侧限抗压强度由15kPa提升到45kPa以上。这不仅仅是强度的提高,更重要的是改变了破坏模式:普通混凝土是脆性破坏,而纳米改性土由于纳米颗粒对应力的分散效应呈现出逐渐破坏的塑性特征,延性提高了两倍以上。在华北某水库示范工程中,采用纳米浆液原位注浆的方法将沉降控制在每月不超过2mm的水平,减少了60%左右。主要原因是纳米材料具有自愈合功能,在微裂纹区域再次发生水化反应,其后期强度损失可低于5%,而传统混凝土为15%~20%<sup>[2]</sup>。

### 2.2 智能传感网络驱动的稳定动态调控

智能化稳定监控系统由被动向主动转变,采用FBG分布式传感器对软土路基的变形及土体内部渗流压力进行在线监测,在0.1mm的空间分辨率上获取软土地基的变形速率和渗流压力变化规律,并利用边缘服务器进行数据筛选后传输到云端服务器,借助机器学习算法预测未来一段时间内路基的沉降量和发展方向,例如在训练集加入以往各时间段的沉降观测值、地下水位以及降雨量信息作为变量,预测未来3d是否会发生失稳情况。对华东某平原水库进行工程实践,在此过程中发现一个可能会失稳的地方:在库水下降5m后,根据算法计算的结果,及时打开坝趾处的泄水阀门,降低孔隙压力上升的速度。

## 3 创新策略与深度实施路径

### 3.1 纳米增强复合材料的原位固化深度优化策略

采用纳米材料替代常规固化剂改善软土地基并非直接代替,而是应从材料-环境-荷载相互作用出发,对纳米材料及其使用方式进行合理调控。为解决纳米浆液扩散及反应速率等问题,在低能量平原地带软土地层中,由于黏粒组含量较高,纳米粒子容易发生絮凝现象,造成浆液扩散受限。因此,该方案将采取以

下措施来增强其效果,控制浆液pH值(8.5~9)和离子浓度,保证纳米SiO<sub>2</sub>在扩散过程中的稳定性;加入缓蚀缓释剂(SiO<sub>2</sub>表面包覆物),使其在孔水压的作用下缓慢释放,持续反应时间达到3d。研究表明,可将纳米颗粒的有效作用范围从80cm增加到150cm,同时避免出现局部过度固化而产生的脆裂现象。更重要的是,根据不同的使用环境来改进固化剂配方,例如对于平原地区的水库,其水位在一年四季内会有一些的变化,可考虑研发一种随温度变化而固化的纳米复合催化剂:若库区水温高于25℃,则混合物中的PNIPAM聚合体发生体积收缩,从而将部分固化剂暴露出来进行快速催化;反之,则聚合体膨胀并封闭所有可能的活性点,避免在较低气温下催化能力减弱<sup>[3]</sup>。

### 3.2 机器学习驱动的稳定动态预测与决策闭环构建

建立的预测模型不能局限于数据模拟,应结合实际工程中可能出现的情况提前进行预判分析。因此,本文不采用现成的数据挖掘方法直接使用,而是基于物理概念约束的基础上利用LSTM进行训练建模,在Biot固结方程基础上引入LSTM预测模型,同时将影响沉降的各种因素作为模型输入层变量,包括土体属性(压缩系数、渗透系数)、荷载工况(浸没速率、浸没时间)和外界条件(降雨量、气温),输入是观测历史记录,输出是地基的安全系数时变曲线以及失稳敏感区域热力图。区别于其他深度学习方法,“物理正则化”的关键在于引入土力学本构方程作为损失函数的一部分,保证输出满足力学规律,并防止纯数据驱动导致的极限状态输出失真现象的发生<sup>[4]</sup>。以长江中下游某一水库为例,基于此模型对过去5年的监测资料进行分析得到,确定滑坡发生的风险临界阈值为降幅>3m/周,并在此基础上制定最优蓄水运行措施,降低滑坡发生的风险率由15%下降到3%。在上述方法应用过程中面临两个关键问题:第一是少量数据训练的问题,运用迁移学习的方法,将已有经验成果迁移到新的水库中去,在缺乏大量历史资料的情况下完成建模任务;第二是机器学习结果的透明度,基于SHAP值进行特征重要性排序并可视化,可视化反映不同孔压增量下对应的安全储备,便于理解并获得工程师认可。

### 3.3 生物酶促固化技术的工程化应用与效能跃升路径

生物酶促法应跨越由实验室走向工程应用的技术瓶颈,兼顾环境友好性和经济可行性对软土进行改良。该方案主要从微生物、酶制剂及土壤三方面入手:构建适宜于高pH值的微生物群落(包括BS-202芽孢杆菌),这类细菌产生的碳酸酐酶最适pH在6~9之间;研制适合的缓释营养包材料(海藻酸钠微球),向软土体内长期供钙补养并提供适宜的酶活条件。主要特点是采用两步凝胶技术,第一步使用稀释尿素激发土壤原位微生物活动以对上部松软土体实施即时加固,7d即可提高土体强度约20kPa,第二步则采用高效生物催化剂对下部松软土体实施定向加固,在江苏太湖地区某大型水库工程中的实践表明,这一方法让处理深度达到8m(常规MICP只有4m),并且碳排放减少了90%,从深度上探究原因发现,是因为在酶的作用下产生的方解石最先沉淀到大的孔隙中起到“支架”的作用,在小孔隙则被微生物分泌

物所填充从而实现了大小孔隙的分级调控;为了落实这个想法,首先要克服的是对温度的依赖,一是利用基因改造提高菌种低温性能(在4℃下催化效率>60%);二是长效稳定性,采用腐植酸诱导方解石晶形稳定化转变技术,减少酸雨腐蚀造成的强度损失<sup>[5]</sup>。

### 3.4多尺度地基-结构协同设计的拓扑优化方法

在软基处治中,不能将“地基-结构”分开考虑进行独立设计,在不同尺度上进行整体综合的最优设计是必要的。“多尺度拓扑优化”的思路是在微观层面基于DEM模拟纳米颗粒与土体颗粒之间的黏结关系,得到纳米材料对土体颗粒间界面剪切强度的影响;在介观层面基于PFC软件研究桩-土界面的滑动规律;大尺度建立有限元-系统动力学混合计算模型进行整个蓄水过程的仿真分析;关键问题是提出一个尺度转换技术——接触力链场向粗化单元本构特性转化并嵌入到大尺度模型之中,实现不同尺度的数据交换。应用该方法对东北地区某平原型水库进行了桩网布置方案的比选,在坝肩处设置较密的短桩(桩长为6m,近端密集短桩(桩长为6m,间距为1.2m)抵抗侧向滑移,坝中使用稀疏长桩(桩长12m,间距2.5m)控制沉降,使得差异沉降减小40%,但进一步深入的是采用拓扑优化方法,在给定安全性大于1.5以及沉降小于50mm的目标函数下生成最优的加固区域,其特点是不同区域有不同密度的纳米注浆点布置在可能的滑弧上。

### 3.5环境自适应型软基处理系统的构建与运行机制

针对平原地区水库环境具有变化性的特征,提出的技术措施应能对环境的变化做出及时反馈,而不是固定不变的方法。该方法包括环境信息采集层(如安装在线检测仪器获取实时水深、温度、酸碱度等指标)、反应层(利用新型功能性材料进行干预)和智能化决策分析平台(基于现场的数据快速处理),以达到动态调节的目的。其中,新型功能材料是关键手段之一。例如,可将能够根据外界刺激发生形变的水凝胶-纳米颗粒复合材料用于水库堤坝建设,在水库水位上涨时,吸水膨胀将纳米粒子挤出,并促进凝固剂发生聚合反应;失水后收缩产生间隙以增大排水通道。应用到淮河平原地区一个小型季节性水库里,在汛期及枯期分别能够提高软土基底的渗流速度至 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 及 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ,从而防止库水快速降落造成的土体液化破坏。其

原理主要是基于两种聚合物分子链上带有不同的功能基团:温敏型/水敏型聚合物为水凝胶。在纳米颗粒上修饰具有外界应答特性的外壳,即“刺激-行为”匹配设计。方法论突破——复杂场景下如何应对?在平地环境中不同区域存在不同的水质状况,例如高含 $\text{Ca}^{2+}$ 的硬质水流,在训练阶段将这些水质情况输入模型进行深度学习,提前设定好各种材质的使用条件,比如当流水中含有较多的钙离子( $>100 \text{mg/L}$ ),则自动选用能适应较高 $\text{Ca}^{2+}$ 含量的纳米颗粒状液体;另外还可以让这个系统持续自我完善升级,即采用RL方法,根据每一次升降后结果的好坏来决定下一步的动作。

## 4 结语

综上所述,平原水库软土地基处理技术发展已经不是单一的工程技术问题,而是集材料技术、信息技术以及生态学技术为一体的综合性技术创新过程。本文提出的基于微观尺度重构理念、微生物作用原理以及环境友好型技术路线在有效解决平原水库建设中地基变形治理和结构安全方面发挥了巨大作用,并且改变了传统的地基处理思路,由以解决问题为目标转为以创新为目的。上述技术成果经过系列示范项目成功应用并证明其安全性和经济性,将助推水工程高质量发展。

## [参考文献]

- [1]徐海龙.运城市樊村水库生态修复工程园路路床处理方案[J].科技与创新,2025,(21):117-119.
- [2]谭敏,李文恒,高绍涌.深厚软基筑坝加固方案设计与优化研究[J].水利建设与管理,2023,43(S1):56-60.
- [3]张志龙.饱和欠固结土大变形非线性固结理论与试验研究[D].宁夏大学,2022.
- [4]邹小红.小地方水库移民安置点软基处理采用CPG桩的应用[J].云南水力发电,2021,37(07):167-169.
- [5]高为民,刘宗志,陈文锋.深层搅拌桩在浸水路堤软基处理中的应用[J].山西建筑,2021,47(04):114-116.

## 作者简介:

郭磊(1981-),男,汉族,湖南澧县人,大学,馆员,研究方向:水利工程运行。