基于智能监测的水工建筑物地基变形控制研究

高多多 许明智
南水北调东线江苏水源有限责任公司 江苏 南京 210000

摘 要 软土地基具有高压缩、低强度、低渗透和流变显著等特性，在水工调蓄水池周期性水位荷载下易产生不均匀沉降与长期残余变形，威胁构筑物防渗和结构安全。本文以软土地区调蓄水池工程为对象，分析地基变形机理、水位循环荷载下的变形规律及池体—地基耦合特征，构建涵盖地表沉降、深层分层变形和孔隙水压力的智能监测体系，并基于连续监测数据建立集加固方案优选、施工智能管控和全生命周期分级预警于一体的数字化变形管控体系。结果表明，该模式可准确捕捉软土时效变形，及时识别沉降异常，有效抑制不均匀沉降和累积塑性变形，显著提升地基稳定性与工程安全储备，可为同类水利基础设施地基变形治理提供参考。

关键词 智能监测；水工建筑物；地基变形控制

Research on Foundation Deformation Control of Hydraulic Structures Based on Intelligent Monitoring

Gao Duoduo, Xu Mingzhi
Jiangsu Water Source Co., Ltd. of the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project, Nanjing 210000, Jiangsu Province, China

Abstract Soft soil foundations are characterized by high compressibility, low strength, low permeability, and significant rheology, and are prone to uneven settlement and long-term residual deformation under cyclic water level loading in hydraulic storage ponds, threatening the seepage prevention and structural safety of structures. Taking a storage pond project in a soft soil area as the research object, this paper analyzes the deformation mechanism of soft soil foundations, the deformation laws under cyclic water level loading, and the characteristics of pond-foundation coupling, and constructs an intelligent monitoring system covering surface settlement, deep layered deformation, and pore water pressure. Based on continuous monitoring data, a digital deformation control system is established that integrates multi-objective reinforcement scheme optimization, intelligent construction process control, and full-life-cycle graded early warning. The results show that this intelligent-monitoring-driven model can accurately capture the time-dependent deformation of soft soil, timely identify settlement anomalies, effectively suppress uneven settlement and cumulative plastic deformation, and significantly improve the stability and engineering safety reserve of hydraulic soft soil foundations, providing a technical reference for foundation deformation treatment of similar water conservancy infrastructure.

Key words Intelligent Monitoring; Hydraulic Structures; Foundation Deformation Control

调蓄水池为农村供水工程的主要水工建筑物，大多建在海相沉积软土的场地之上，软土特有的力学性质极易造成地基固结沉降、结构不均匀变形等工程问题。同时水池蓄水、排空产生的周期性循环荷载，又会不断使软土产生塑性变形积累，进而造成后期池体开裂、防渗失效、结构位移超标等安全问题。传统的手工监测手段采集频次低、数据分散、滞后性大，不能体现软土长期的流变变形及动态沉降变化，不能满足精细化、全过程的变形控制要求。伴随着智慧水利的建设，智能传感监测、大数据分析、数字化管控技术也渐渐应用到岩土工程变形治理当中。因此本文以实际调蓄水池工程为依托，对基于智能监测的水工建筑物软土地基变形规律进行研究，创建全流程数字化变形控制体系，提高水工地基的安全管控水平。

1 工程概况

该工程为供水二期配套的农村供水调蓄水池工程，场地为典型的海相沉积软土分布区。经研究可知，该区地基主要由第四纪全新统沉积而成，软土层厚度大，以淤泥质软土为主，工程性质差。土层天然含水量多处于45%～65%范围内，压缩系数为0.8～1.2 MPa^{-1}，压缩模量仅为2.5～4.0 MPa，天然孔隙比为1.2～1.8。由于土体中蒙脱石和伊利石的含量比较高，吸水后结构强度会显著降低，在外荷载的作用下容易产生较大的压缩变形。从抗剪强度指标看，软土强度随埋深增加而逐步提高。浅层土体不排水抗剪强度一般小于20 kPa，深层可以提高

到40 ~ 60 kPa。同时软土渗透系数一般在10^{-6} ~ 10^{-7} cm/s之间，排水条件差，固结时间长，所以沉降发展具有明显的长期性和时效性。调蓄水池在运行时就具有明显的循环荷载。本工程满水状态下池底荷载为180 ~ 220 kPa，排空后只剩下池体自重荷载，为60 ~ 80 kPa。周期性的蓄水、放水使地基处在持续的反复加卸载之下。按照应力扩散规律来分析，底板附加应力在深处逐渐扩散开来，在软土层里形成非均匀应力场。由于场地土层分布及池体边界条件比较复杂，造成池体各个区域沉降发展情况也不一样，是后期地基变形控制过程中需要特别注意的方面[1]。

2 调蓄水池软土地基沉降变形规律及影响因素分析

2.1 多层级一体化沉降智能观测系统布设方案

根据30 m × 50 m矩形调蓄水池结构形式、软土变形特点以及运行期水位变化情况来建立一个集地表沉降、深层分层压缩、孔隙水压力检测为一体的智能观测系统。与传统的定期人工观测相比，该系统可以得到连续的沉降演化数据，给沉降演化分析提供完整的时序数据支持。监测点用平面和深度相结合的方式进行布置。地表沉降点沿池体外边缘布置，在池体内布设十字形主监测线，构成对底板区域全部进行沉降观测的网络。根据软土分层变形的特点，在5 m、10 m、15 m、20 m不同的深度埋设磁环式深层沉降仪来分层识别各深度范围的压缩量，进而区分出浅层压缩和深层固结的不同。各个监测基准点设置于池外稳定的区域内，基桩穿过多层软土进入比较稳定的持力层，以保证监测基准的可靠（见图1）。

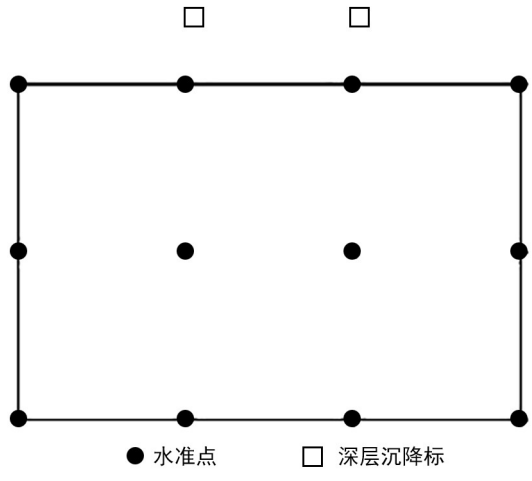


图1 调蓄水池沉降观测点布置平面图

硬件系统用高精度电子水准仪、分布式孔隙水压力计、位移采集传感器和远程传输模块组成自动化采集网络。系统可以按照预先设定好的频率自动进行数据的记录以及上传，不需要经常到现场去。为了提高监测结果的可解释性，在现场同步设置视频监控设备来记录水位变化、地表异常、池体裂缝等现象，使图像信息和数值信息互相验证。监测系统利用标准接口与数字平台相接，从而达成地基状况的持续感知以及集中治理。

2.2 调蓄水池差异性沉降空间分布特征

调蓄水池地基沉降呈明显非均匀分布，由荷载传递、底板刚度、边界约束及软土非线性响应等因素共同作用所致。矩形池体边角处应力集中，附加应力与沉降量显著大于池底中部；中部受底板整体刚度和侧向约束作用，沉降速率较低、累积沉降量较小。这种差异沉降对结构稳定构成潜在威胁：应力集中区易致裂缝扩展，削弱防渗体系有效性；沉降不均加剧后，节点负荷超出设计值，局部渗漏和耐久性退化风险增大。长期观测数据可揭示各阶段沉降变化范围及速率梯度分布，为风险评价提供量化依据。监测结果超过规范限值时，须及时采取工程加固或调整运行方式。相比人工巡检仅能获取阶段性定点数据，智能传感技术可实时采集全时段沉降轨迹，准确识别高风险区域发展趋势，为早期预警和精细化管理提供支撑[2]。

2.3 周期性水位荷载对地基时效变形的驱动机制

调蓄水池运行期水位周期变化是软土地基时效变形持续发展的主因。蓄水时池底附加应力增大，软土内超孔隙水压力上升；排空时外荷载迅速减小，但孔压无法短时间内完全消散，土体内仍存残余孔压。若下一轮蓄水前残余孔压未完全消失，孔压将在循环中逐渐积累，延长土骨架有效应力调整过程，导致塑性变形不断累积。水位变化速率亦显著影响变形：快速蓄水或排空使荷载变化与排水固结过程不协调，土体长期处于高孔压状态，局部抗剪强度降低，沉降增量进一步增大；浅层高含水软土中，快速荷载变化易引发短期附加沉降和局部失稳。同步采集水位、孔压和分层沉降数据，可建立循环荷载与累积沉降的关系，分析各阶段变形发展规律。一般而言，随循环次数增加，单周期沉降增量逐渐减小，表明地基进入稳定发展阶段，但长期流变和残余沉降仍不会自然消失，仅靠天然固结难以满足长期运行要求。因此，必须结合地基处理和运行控制手段，对时效变形进行持续约束[3]。

3 基于智能监测的水工软土地基变形数字化控制技术体系

3.1 多目标地基加固方案数字化优选方法

在海相厚软土和调蓄水池动态荷载共同作用的复杂工程环境下，单一种类的技术途径很难做到承载能力加强、沉降情况改善并且持久稳定。在这种情况下，建立以数字化评价为依托的综合加固方案选择体系就显得特别重要了。目前主要的复合

地基处理方法有水泥粉煤灰碎石桩（cement fly-ash gravel pile，CFG）法、水泥搅拌桩法、强夯与真空预压联合施工法、振冲咬合桩法等，各有优缺点，但适用范围较广，不同工程中采用的复合地基处理技术不尽相同。本研究利用层次分析法创建多目标决策体系，把承载力增长、差异沉降控制效果、工序进度、初始投资数量、运行可靠状况以及深入改良效果当作主要评价指标，并联系具体项目地质特性（软土特性）、结构参数及荷载情况等要素展开系统量化剖析之后找出最佳实施方案。根据底板应力分布规律进行功能分区，在重要节点处加强施工处理方法，在其他非重点地方用一般性的处理方法来达到经济性与可行性之间的平衡。整个设计方案全流程依靠智能化信息技术平台来执行，可以很好地防止人工计算过程中出现的人为误差，而且能够大幅度地提高整体工作的效率和精确度。

3.2 智能监测驱动的复合地基施工数字化管控流程

为了保证地基处理效果，必须把智能监测贯穿于施工全过程，形成感知、传输、分析、预警、反馈调整的闭环控制机制。第一阶段为场地预处理、监测设备的布设管理。清淤、砂垫层施工完成后，根据地理信息系统（geographic information system，GIS）数字底图布设排水板、深层沉降仪、孔压计，自动记录各设备的平面坐标和埋深信息，上传到管理平台，形成完整的监测数据库。第二阶段就是加固施工过程的动态监测。强夯、排水板插设、真空预压设备都装有物联网模块，可以对夯击能量、夯点位置、排水板深度、真空负压等参数进行实时采集。与此同时，现场监测系统不断地发出沉降、孔压等数据。平台把施工参数同监测响应做对比分析，如果出现夯击不够、真空度低或者局部沉降增速加快的情况，就会立刻发出提示，促使施工人员马上改变工艺参数。第三阶段为预压固结期变形评价。根据连续监测结果，用改进Asaoka法、双曲线法对沉降时序曲线进行拟合，得到最终沉降量及固结完成时间。当监测数据表明沉降和孔压趋于稳定的时候，系统可以自动生成固结达标报告；如果收敛速度过慢，则可以建议延长预压时间或者采取补充措施[4]。

3.3 地基变形智能预警与长效控制数字化应用

施工期和运行期都要进行变形预警管理。根据监测系统采集的多源时序数据，可以建立分级预警模型，以总沉降、分层压缩量、相对沉降、孔压增长速率、水位变化速率为主要指标，参照规范控制标准分为蓝色正常、黄色关注、橙色预警、红色危险4个等级。

施工阶段的预警重点就是看加固工艺是否符合设计要求。预警出现时可以迅速找到对应的施工区段、设备参数，及时采取补强、整改措施，防止地基处理缺陷进入运行阶段。运行阶段主要是对蓄排水循环所造成的累积沉降和残余变形进行识别。监测系统长时间观测水位、沉降、孔压的变化，一旦某个区域的沉降速率突然变大，平台就会把历史数据拿出来分析原因，再给出调整蓄排水速率、局部加固或者加强巡检等建议。另外，数字化平台可以自动保存监测成果、施工记录、预警信息和处置过程，形成完整的地基变形数据库。当水池后期出现渗漏、底板开裂或者局部错台的时候，可以调取历史数据进行对比分析，从而准确地判断出病害的原因并制订出相应的治理方案。与传统的依靠人工定期检查的管理模式相比，该体系实现了从事后发现问题到事前识别风险、过程控制的转变，对保障软土地区水工建筑物运行安全有现实意义[5]。

4 结束语

本文根据软土地基的基本特征和调蓄水池的循环荷载工况，对水工地基差异性沉降、时效变形的形成机理及影响规律进行了分析，建立了一个多维度一体化的智能监测体系，提出了加固方案数字化优选、施工智能管控、全周期预警干预的地基变形控制技术体系。利用智能监测高频连续感知数据，克服了传统监测不能捕捉到软土流变变形、滞后研判风险的不足，实现了地基变形由事后处置向动态预判、提前调控的转变。该技术体系可以精确控制不均匀沉降，抑制长期残余变形，保证水工构筑物长期稳定运行，对水利工程地基治理智能化、精细化发展有较好的应用价值。

参考文献

[1]张艳.水旱灾害防御下基于沉降分析技术的水库大坝监测研究[J].水利科技与经济,2025,31(10):111-116.

[2]李江,高攀,周燕,等.基于动态视觉测量的廊道沉降监测方法[J].中国水利,2025(18):39-43.

[3]吕谢雨.多源点云辅助SBAS-InSAR的大坝沉降监测[D].太原:太原理工大学,2025.

[4]钟京胜.三角高程测量在大坝沉降监测中的应用[J].四川水泥,2025,(5):22-24.

[5]罗利.锁扣钢管桩围堰施工监测分析——以嘉陵江三桥为例[J].科技和产业,2023,23(4):206-212.

（本文编辑 杜宇琪）