

# 港口深层土体孔隙水压力自动监测系统研究

邢义

(中交天津港湾工程研究院有限公司)

**摘要:**为解决港口工程深层土体孔隙水压力监测中存在的人工测量精度低、数据连续性差等问题,研发了一套基于振弦式传感器的自动化监测系统。该系统采用高精度压力传感器阵列实时采集数据,集成远程传输和智能预警功能,实现全自动监测。系统应用表明:测量精度达到 $\pm 0.1$  kPa,数据传输准确率99.8%,运行稳定性误差控制在 $\pm 0.5\%$ 内。通过对两组监测断面90 d的连续监测数据分析,揭示深层土体孔隙水压力时空演化规律,建立压力衰减预测模型,为港口工程施工过程精细化管理提供技术支持。

**关键词:**港口工程;孔隙水压力;自动化监测;施工安全

## 0 引言

随着港口工程建设规模不断扩大,深层土体稳定性直接关系工程安全。近年来,孔隙水压力监测技术研究取得显著进展。雷诗芸等<sup>[1]</sup>研究海底沉积物中气囊产生过程的超孔隙水压力变化特征,揭示了压力传播机制。钱晓华等<sup>[2]</sup>分析地铁振动荷载下隧道周边土体孔隙水压力响应,提出了压力-沉降耦合模型。黄涛<sup>[3]</sup>探讨了非饱和和砂土孔隙压力湿度特性对强度的影响规律。

在工程应用方面,传统人工监测存在诸多问题。李睿<sup>[4]</sup>通过预制桩施工案例分析指出传统人工监测误差大、频率低等缺陷。贺德龙<sup>[5]</sup>研究了渗流-应力耦合作用下深基坑施工过程中的压力变化,强调了连续监测的重要性。成英才等<sup>[6]</sup>和张伙根等<sup>[7]</sup>的工程实践表明,实时监测对确保施工安全具有重要意义。然而,现有监测方法普遍存在精度低、采样频率不足、缺乏远程监测预警等问题,难以满足大型港口工程施工需求。

现有港口工程深层土体孔隙水压力监测技术中传统人工测量方法存在诸多问题:1) 误差普遍在 $\pm 2$  kPa以上,监测精度难以满足工程要求;2) 由于采样频率限制,无法有效捕捉土体压力的瞬态变化特征;3) 缺乏系统的远程监测预警方案,难以及时发现和处理施工风险。此外,现有研究对孔隙水压力时空演化规律的分析方法较为单一,制约了对深层土体压力变化机理的深入研究。

针对上述问题,本研究开发了一种基于振弦式传感器的自动化监测系统。系统采用高精度压

力传感器阵列实时采集数据,将传感器测量精度提升至 $\pm 0.1$  kPa;通过远程数据传输和智能预警功能,实现全天候自动监测,数据传输准确率达99.8%;基于大量监测数据,建立了深层土体孔隙水压力时空演化模型,为施工过程精细化管控提供理论依据。本研究成果在提高监测精度、保证数据连续性、预测压力变化趋势等方面取得重要突破,为港口工程施工安全监测提供了创新性的技术方案和理论支撑。工程实践表明,该系统可有效指导施工过程,对确保港口工程建设质量和安全具有重要意义。

## 1 监测系统设计

自动化监测系统主要由3个子系统组成:压力传感器测量系统、数据采集传输系统和数据处理分析系统。系统采用分层布置的方案,在不同深度设置测点,通过高精度压力传感器实时采集孔隙水压力数据。压力传感器的测量原理基于振弦式传感技术,其核心计算公式为:

$$P=K(f_1^2-f_0^2)$$

式中: $P$ 为孔隙水压力值, kPa;  $K$ 为传感器标定系数;  $f_1$ 为测量时的传感器振动频率, Hz;  $f_0$ 为初始振动频率, Hz。

系统采用的数据采集与传输方案技术指标为:监测参数技术指标测量范围0~1 000 kPa;测量精度 $\pm 0.1\%$  F.S;采样频率1次/h;数据传输方式为4G无线传输;供电方式为太阳能+蓄电池;防护等级IP67。

在数据采集方面,系统采用了模块化设计理

念，每个测点配备独立的数据采集单元，通过RS485总线与中央控制器连接。数据采集单元采用24位高精度A/D转换，能够保证测量数据的准确性。同时，系统采用了抗干扰设计，在信号传输过程中采用多重滤波和校验机制，有效提高了数据的可靠性。

系统的特色在于实现了全自动化运行和智能化管理。通过远程数据传输模块，监测数据可实时上传至云服务器，并通过Web端或移动终端实时查看。系统还配备了多级预警机制，当监测数据超过预设阈值时，可自动发出预警信息，及时提醒工程管理人员采取相应措施。

## 2 工程应用分析

### 2.1 工程概况

本研究选取某大型港口码头工程作为应用示范工程，该工程位于渤海湾区域，总占地面积约128万m<sup>2</sup>，其中水工结构段长度达2.3 km。场地地质条件复杂，从上至下依次为：①层淤泥质黏土(层厚4.5~6.2 m)、②层粉质黏土(层厚8.2~10.5 m)、③层砂质黏土(层厚12.3~15.8 m)、④层粉细砂(层厚>20 m)。地下水位埋深较浅，原始地下水位距地表约1.2~1.8 m。本工程采用大面积真空预压方案进行地基处理，预压区域分为东、西2个区块，总预压面积约85万m<sup>2</sup>。

本工程共布设2组监测断面(KX03和KX04)，每组断面沿深度方向布置6个测点，测点深度分别为-19 m、-22 m、-25 m、-28 m、-31 m和-34 m。监测点采用全自动监测系统，数据采集频率为1次/h。系统运行时间为2020年8月21日—11月23日，共计90 d的连续监测数据。监测断面的布置充分考虑了地层分布特征和预压影响范围，以期获取最具代表性的监测数据。监测方案的具体参数如表1所示。

表1 监测方案

监测项目	监测频率	监测周期/d	预警值	报警值
孔隙水压力	1次/d	90	85%设计值	95%设计值
地表沉降	1次/d	90	90%预估值	95%预估值
分层沉降	1次/周	90	85%预估值	90%预估值

### 2.2 监测结果分析

#### 2.2.1 孔隙水压力时空分布特征分析

通过自动化监测系统，获取了90 d内不同深度测点的连续监测数据。以KX03测点群(测点编号依次为KX03-1、KX03-2、KX03-3、KX03-4、

KX03-5、KX03-6)为例，分析深层土体孔隙水压力的时空分布特征及其演化规律。表2为KX03断面各测点的孔隙水压力监测数据，图1为压力变化过程曲线。

表2 KX03断面各测点孔隙水压力监测表

测点编号	标高/m	孔隙水压力值/kPa	本期变化值/kPa	累计变化值/kPa	超静水压力值/kPa
KX03-1	-19.0	16.3	-2.8	-179.1	12.9
KX03-2	-22.0	94.5	-7.2	-133.1	61.1
KX03-3	-25.0	95.4	-11.5	-154.2	31.9
KX03-4	-28.0	142.7	-7.5	-147.3	49.2
KX03-5	-31.0	187.7	-6.4	-126.6	64.2
KX03-6	-34.0	241.1	-2.8	-99.6	87.6

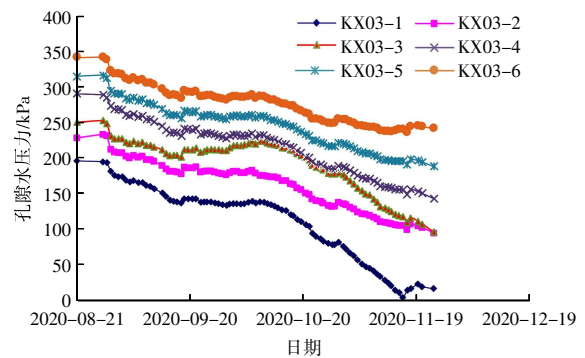


图1 KX03断面各测点孔隙水压力变化过程曲线图

将KX03断面孔隙数据用MATLAB进行分析，输出3D柱状图，三维时空分布图见图2。

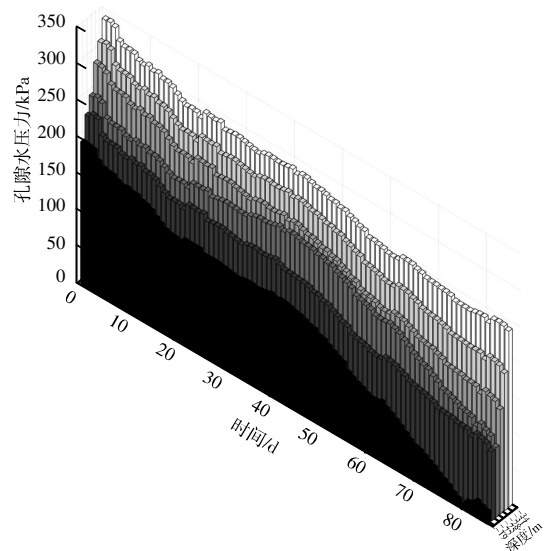


图2 KX03断面各测点孔隙水压力的时空分布图

通过对KX03测点群的孔隙水压力监测数据进行三维可视化分析，可以直观地反映出深层土

体孔隙水压力的时空演化规律。如图2所示，该三维柱状图以深度和时间为底平面坐标，以孔隙水压力值为竖向坐标，利用颜色深浅变化辅助表达压力的变化趋势。通过对监测数据的系统分析，发现以下特征：

1) 从空间分布特征来看，孔隙水压力随深度呈现明显的分层递增趋势。在初始状态下，-19 m深度处的压力值为195.5 kPa，而在-34 m处达到340.7 kPa，平均每米深度的压力增量约为9.7 kPa。这种压力梯度分布与土层的重度和渗透性密切相关，反映了场地土层的基本水文地质特征。

2) 从时间演化特征来看，各深度测点的压力值均呈现出非线性衰减趋势，但衰减速率存在明显差异。浅层测点(-19~-25 m)的压力衰减较快，90 d内压力降幅达到初始值的45%~55%；而深层测点(-28~-34 m)的压力衰减相对缓慢，同期压力降幅为30%~40%。不同深度压力衰减速率的差异为评估固结进程提供了重要依据。

从工程实践角度看，这种时空分布特征具有重要意义：

1) 压力梯度的变化反映了土层的固结状态，可用于评估地基处理效果；

2) 不同深度压力衰减速率的差异，可以指导分层固结计算和沉降预测；

3) 压力等值面的形态变化，可以用于判断固结发展的均匀性。

通过对这些特征的定量分析，可以为工程施工过程的监控和调整提供科学依据。例如，当某一深度的压力衰减速率显著低于理论预期时，可能预示着该处排水通道受阻或固结不充分，需要采取相应的工程措施。

### 2.2.2 深度相关性分析

为了探究不同深度土层之间的孔隙水压力传递关系，本研究对各测点数据进行了相关性分析。结果表明，相邻深度测点间表现出较强的关联性，相关系数普遍高于0.85，说明深层土体的孔隙水压力变化具有明显的连续性特征。随着测点间深度差的增加，相关系数逐渐降低，但最小值仍保持在0.62以上，这反映出不同深度土层之间存在稳定的水力联系。

通过对90 d监测期内压力变化趋势的分析，发现各深度测点的压力值均呈现先快速下降后趋于稳定的特征。以KX03-1测点为例，在监测初

期(前30 d)的平均压力变化速率达到-1.97 kPa/d，之后逐渐趋缓。这种变化特征与土体固结过程相吻合，可为评估地基处理效果提供重要依据。

这些发现对优化监测方案具有重要的指导意义。例如，可根据相邻测点间的相关性，合理调整测点布置密度，在保证监测效果的同时提高系统效率。同时，压力变化速率的分析结果也可用于预测固结进程，指导施工进度控制。

### 2.2.3 系统可靠性验证

系统可靠性主要从数据采集成功率、数据传输准确率、供电系统稳定性、传感器完好率4个方面进行验证，可靠性验证情况见表3。系统运行误差基本控制在±5%以内。

表3 系统可靠性验证情况表

性能指标	实测值	设计要求
数据采集成功率	99.3	≥95
数据传输准确率	99.8	≥98
供电系统稳定性	99.5	≥95
传感器完好率	100	≥98

## 3 结语

本研究针对港口工程深层土体孔隙水压力监测这一核心问题，从技术创新、工程实践和数据分析三个维度展开了系统性探索。研究表明，基于振弦式传感器的自动化监测系统不仅解决了传统人工监测中的技术瓶颈，更为深入认识深层土体力学行为提供了新的研究范式。

在技术层面，系统实现的±0.1 kPa测量精度和99.8%的数据传输准确率，为深层土体孔隙水压力变化规律的精确研究奠定了基础。通过建立压力衰减预测模型，成功揭示了孔隙水压力随深度和时间的非线性演化特征，这一发现对于优化软土地基处理方案具有重要指导意义。

然而，本研究仍存在以下不足：

1) 监测周期为90 d，相对工程建设全周期而言偏短，难以完整反映土体长期固结特性；

2) 监测点的空间分布仅覆盖竖向剖面，缺乏平面分布特征的系统性数据；

3) 系统对极端天气条件下的适应性有待进一步验证。

未来研究可从拓展智能预警模型，引入机器学习算法提升系统对异常状态的识别能力。开发分布式监测网络，实现对大面积施工区域的立体

化监测。这些深化研究将进一步推动港口工程深层土体监测技术的发展，为提升港口工程施工质量和安全管理水平提供更可靠的技术支撑。

#### 参考文献：

- [1] 雷诗芸,刘慧芳,郭秀军,等.海底沉积物中气囊产生过程超孔隙水压力变化特征分析[J].海洋湖沼通报,2024,46(2):51-61.
- [2] 钱晓华,秦文茜,张坤.地铁振动荷载下小半径曲线段隧道周边土体孔隙水压力响应及沉降研究[J].安全与环境工程,2023,30(4):86-99.
- [3] 黄涛.非饱和砂土孔隙压力湿度特性及其对强度影响研究[D].青岛:青岛理工大学,2023.
- [4] 李睿.预制桩施工中超孔隙水压力监测案例分析[J].四川水泥,2022(10):136-138.
- [5] 贺德龙.考虑渗流-应力耦合作用的地铁车站深基坑施工过程分析[D].沈阳:沈阳建筑大学,2021.
- [6] 成英才,樊建房,胡朋.孔隙水压力监测在强夯施工中的应用研究[J].交通世界,2020(26):55-57.
- [7] 张伙根,李凯,王晶.浅谈软基处理过程中监测的重要性及案例分析[C]//工程排水与加固技术及港口工程理论与实践——第十二届全国工程排水与加固技术研讨会暨港口工程技术交流大会论文集.2023:8.