

# Monitoring and analysis of deep foundation pit engineering in soft soil area

Daojian Ji

Zhejiang Chemical Engineering Geological Survey Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311122, China

## Abstract

As urbanization accelerates, the development and utilization of urban underground spaces are expanding. Deep foundation pit projects in soft soil areas are also increasing. Soft soil is characterized by low strength, high compressibility, and poor permeability, posing significant challenges to the design and construction of deep foundation pits. To ensure the safe construction of deep foundation pits in soft soil areas, effective monitoring and analysis are essential. This article, based on the author's practical experience, analyzes and discusses the characteristics of deep foundation pit projects in soft soil areas, as well as the monitoring and analysis techniques used in these projects.

## Keywords

soft soil area; deep foundation pit; engineering; characteristics

## 软土地区深基坑工程的监测与分析

纪道建

浙江化工工程地质勘察院有限公司, 中国·浙江 杭州 311122

## 摘要

随着城市化进程的加速, 城市地下空间的开发利用日益广泛, 深基坑工程在软土地区的建设也越来越多, 软土具有强度低、压缩性高、透水性差等特点, 给深基坑工程的设计与施工带来了诸多挑战, 为确保软土地区深基坑工程的安全施工, 对其进行有效的监测与分析至关重要。本文根据笔者工作实践, 对软土地区深基坑工程的特点、软土地区深基坑工程的监测与分析等进行了分析和探讨。

## 关键词

软土地区; 深基坑; 工程; 特点

## 1 引言

在软土地区进行深基坑工程建设时, 由于软土的特殊工程性质, 基坑开挖过程中极易出现土体变形、支护结构失稳等问题, 不仅会影响工程本身的进度与质量, 还可能对周边环境造成严重破坏, 如周边建筑物倾斜、地下管线破裂等, 因此, 通过科学合理的监测手段, 实时掌握基坑及周边土体的变形情况、支护结构的受力状态等信息, 并对监测数据进行深入分析, 及时发现潜在风险, 采取相应的控制措施, 对于保障软土地区深基坑工程的安全可靠实施具有重要意义。

## 2 软土地区深基坑工程的特点

软土作为一种特殊的工程地质材料, 其独特的物理力学性质对深基坑工程的稳定性构成了严峻挑战, 从工程地质

学角度, 软土通常指天然含水量高、孔隙比大、压缩性强且抗剪强度低的饱和黏性土, 主要包括淤泥、淤泥质土和部分高灵敏度的黏土, 尤其在我国东部沿海地区, 软土分布广泛且厚度较大, 这给当地的深基坑工程带来了特有的技术难题。

软土最显著的特点是含水量通常接近或超过液限, 孔隙比普遍大于 1.0, 这使得土体在受力后极易发生塑性变形, 同时, 软土具有明显的流变特性, 表现为蠕变和应力松弛现象, 即在恒定荷载作用下变形会随时间持续发展, 或在恒定变形条件下应力会逐渐衰减, 使得软土地区深基坑的变形往往不会在开挖后立即稳定, 而是会持续相当长的时间, 此外, 软土的渗透系数通常在  $10^{-6}$ ~ $10^{-8}$  cm/s 量级, 极低的渗透性导致基坑降水过程中孔隙水压力消散缓慢, 有效应力增长滞后, 进一步加剧了土体的变形。

【作者简介】纪道建 (1990-), 男, 中国河南商城人, 本科, 工程师, 从事基坑监测研究。

表 1 软土与一般黏性土工程性质对比

| 性质参数    | 软土                                 | 一般黏性土                              | 影响差异           |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|----------------|
| 天然含水量   | 40%~80%                            | 20%~40%                            | 软土更易发生塑性变形     |
| 孔隙比     | 1.0~2.0                            | 0.5~1.0                            | 软土压缩性显著更高      |
| 不排水抗剪强度 | 10~30kPa                           | 50~150kPa                          | 软土地区基坑更需加强支护   |
| 渗透系数    | $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$ | $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{cm/s}$ | 软土中孔隙水压力消散慢    |
| 压缩系数    | $0.5 \sim 2.0 \text{MPa}^{-1}$     | $0.1 \sim 0.5 \text{MPa}^{-1}$     | 软土地区沉降更大且持续时间长 |

### 3 软土地区深基坑监测

软土地区深基坑工程的监测工作需要构建一套全方位、多层次的监测体系，以全面掌握基坑及周边环境在各种施工工况下的响应特征，完善的监测系统不仅应包括围护结构本身的变形和受力状态，还需涵盖地下水位变化及周边环境的影响，从而形成对基坑工程安全状态的立体化认知，针对软土的特殊性质，监测项目的设置应更为全面，监测频率也需相应提高，特别是在关键施工阶段（如支撑拆除、降水施工等），甚至需要实施 24 小时连续监测。

#### 3.1 围护结构监测

由于软土地区土体强度低、压缩性高，在开挖过程中围护墙体极易发生水平位移或垂直沉降，稍有疏忽便可能引发滑移、失稳等结构性灾害，围护结构监测主要关注水平位移与垂直位移。

水平位移通常通过测斜仪布设于支护结构内部，观测墙体随深度方向发生的侧向变形情况，这一指标反映了土体受扰动后侧压力变化，是判断支护系统稳定性的重要依据。以某沿江软土基坑工程为例，其 CX5 号测斜点在 2024 年 3 月 20 日至 21 日监测数据显示，0.0m-11.0m 深度范围内的位移均超过报警阈值 3mm，其中 3.5m 处水平位移最大，达到向坑内 9.25mm，明确预警墙体可能出现滑移趋势，借助此监测结果，施工单位立即采取加设腰梁和增设支撑等措施，有效避免了结构变形进一步扩大。垂直位移方面，通常采用高精度水准测量法，对围护墙顶及周边参考点进行周期性监测，掌握围护结构的沉降或隆起趋势，该项目连续监测数据显示，墙顶沉降最大点位发生在基坑北侧，累计沉降达 12.8mm，明显高于设计控制标准 10mm，表 2 展示了典型点位的围护墙体变形趋势：

表 2 典型点位的围护墙体变形趋势

| 点位编号 | 深度范围 (m) | 水平位移 (mm) | 垂直位移 (mm) | 报警值 (mm) | 趋势  |
|------|----------|-----------|-----------|----------|-----|
| CX5  | 0.0~11.0 | 9.25      | 3.6       | 3.0/10.0 | 增长中 |
| CX6  | 0.0~12.0 | 6.75      | 2.4       | 3.0/10.0 | 稳定  |
| CX7  | 0.0~10.5 | 4.3       | 12.8      | 3.0/10.0 | 稳定  |

从表中可以看出，不同点位的变形响应具有明显差异

性，与其周边土体性质、支护结构刚度、施工阶段等因素密切相关，通过细致的围护结构变形监测，不仅可以及时预判风险，而且为支护结构的校核与优化设计提供了数据支撑。

#### 3.2 支撑系统监测

在软土深基坑工程中，支撑系统承载着围护结构的内力传递任务，是维持坑壁稳定的重要组成部分，由于软土具有明显的流变特性，即随时间应力-应变关系会发生变化，因此支撑系统的应力状态不是静态不变的，而是随着开挖深度、降水进程和地基变形动态演化的，必须进行持续性的轴力监测。

钢支撑系统的监测通常采用表面安装式应变计，如电阻应变片，通过实时监控钢支撑在施工过程中所受轴力的变化。混凝土支撑的应力监测则多采用埋设式钢筋计或混凝土应变计，这些传感器能够反映结构内部的受力状态，适用于长期埋入结构中进行变形分析。在某大型深基坑工程中，1 号钢支撑设置的 3 个应变计分别监测到自开挖第 5 天起，轴力逐日上升，至第 12 天时最大值达到 415kN，比设计预估值高出 15.6%，为施工单位调整支撑截面、增加斜撑提供了时间窗口。

随着深基坑开挖深度的增加以及软土流变影响的累积，支撑系统的轴力监测不仅是对结构安全性的直观反映，也为预测围护结构变形趋势和进行施工阶段性优化提供重要支撑。因此，建议在软土深基坑施工中，对主要支撑轴力实施自动化实时监测并结合施工日记进行联动分析，以实现“预警—响应—调整”的闭环安全管理。

#### 3.3 地下水位监测

在软土深基坑工程中，地下水位的变化不仅关系到土体有效应力的稳定，也直接影响降水引发的沉降量和支护系统受力状态，由于软土颗粒结构松散、孔隙比大，受水浸润易软化甚至流动，地下水控制成为工程安全的关键。

地下水位的监测通常采用钻孔埋设静水位管并结合数字水位计实时记录水位变化，在某铁路隧道接收井工程中，采用悬臂式帷幕降水方式控制地下水位，通过对四种不同降水工况进行模拟与现场实测对比，结果显示，井内水位模拟与实际降水数据高度吻合，误差小于  $\pm 0.1\text{m}$ ，而井外监测井误差却高达 0.45m，这表明地下帷幕结构在井外区域存在渗漏通道，需进一步优化帷幕闭合完整性。此外，因软土地区降水常伴随大范围地面沉降，地下水位变化与地表沉降监测须同步开展，在该工程中，降水持续 15 天后，基坑边缘 20m 处的地面累计沉降达 21.3mm，显著高于设计预期（15mm），进一步分析发现，该区域原存在暗浜回填层，降水引发了回填土压缩及固结沉，因此，地下水位监测不仅应服务于降水控制，也要联合地面沉降与孔隙压力监测手段，形成地下-地表一体化的沉降评估系统，为软土地区基坑降水设计和施工提供科学依据。

## 4 软土地区深基坑监测数据分析

软土地区深基坑监测产生的海量数据只有通过科学分析才能转化为有价值的工程信息，指导施工决策。传统的单一指标分析已难以满足软土地区复杂工况下的安全评估需求，现代工程实践越来越注重多源数据耦合分析方法，通过挖掘不同监测指标间的内在关联，全面把握基坑系统的真实状态。同时，随着数值模拟技术和信息化施工技术的发展，监测数据分析正从经验判断向理论指导与数据驱动相结合的方向转变，为软土地区深基坑工程的安全控制提供了更为科学的手段。

### 4.1 多指标耦合分析

在软土地区的深基坑工程中，单一监测指标往往难以准确反映基坑的真实受力状态，尤其在软土流变性显著背景下，容易出现某项指标突变而其他指标未响应的“假警报”现象。因此，基于多指标的耦合分析成为提高监测预警准确性的重要手段。以某美食广场基坑为例，在支撑体系施工期间，混凝土支撑轴力多次超过报警阈值，单看数据似乎存在严重结构问题，然而，通过将支撑轴力、坑顶水平位移、深层位移等指标进行耦合分析，工程师发现该异常更多源于结构自重徐变和昼夜温差变化所引起的应力波动，围护结构的变形未超出预警范围，基坑实际仍处于安全状态。这一判断避免了误判所带来的不必要停工和补强。

有效的耦合分析依赖于构建多个监测指标之间的相关性模型，以围护结构水平位移（ $X$ ）、支撑轴力（ $F$ ）与地表沉降（ $S$ ）为例，通常可建立如下简化模型：

$$S=aX+bF+c$$

其中参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  通过统计回归确定，用于界定正常工况下的三者关系。若监测数据偏离模型预测值超过设定误差阈值，则应启动预警机制。多指标耦合分析不仅有助于识别“假警报”，也可及早发现潜在失稳风险。

### 4.2 时空效应分析

软土的高孔隙率、低剪切强度和显著的时间依赖性，决定了其变形行为具有显著的“时空效应”特征。时效性指软土变形会在外力撤除后仍持续发展一段时间，表现为蠕变和二次固结沉降，空间性则体现为不同部位在同一时间下响应幅度和方向差异明显。因此，分析监测数据的时间演化规律和空间分布特性，是理解深基坑变形机制和优化监测布点的基础。

### 4.3 数值模拟与实测对比

在软土深基坑监测领域，数值模拟技术的引入显著提升了监测数据的理解深度和预警响应能力。数值模拟不仅能

够预测基坑结构在不同施工阶段的响应，还能与实际监测数据形成闭环验证机制，从而动态优化施工方案和监测策略。以苏州河深隧道超深基坑工程（基坑深度达 56.3m）为例，研究人员构建了基于 Biot 固结理论的三维流固耦合有限元模型，并采用两种分析路径进行对比：一种是常规的单向耦合分析（UCA），另一种是考虑水土相互作用的双向耦合分析（BCA）。

两种模型预测值与实测数据的对比如表 3 所示：

表 3 两种模型预测值与实测数据的对比

| 项目             | 实测值  | UCA<br>计算值 | 偏差<br>(%) | BCA<br>计算值 | 偏差<br>(%) |
|----------------|------|------------|-----------|------------|-----------|
| 最大水平位移<br>(mm) | 31.5 | 44.9       | 42.35     | 36         | 14.35     |
| 最大支撑轴力<br>(kN) | 1980 | 2264       | 14.3      | 2182       | 10.27     |

由表可见，BCA 模型在两个关键指标上的预测误差均显著小于 UCA 模型，尤其是在围护结构最大水平位移的预测上，BCA 将误差从 42.35% 降低至 14.35%。这表明传统方法在面对软土变形机制时存在明显局限，而耦合模型更能体现地下水与土体共同作用的动态特征，为监测与预警提供了更具实效性的依据。

## 5 结语

软土地区深基坑工程监测与分析是一项复杂的系统工程，对保障工程安全和周边环境稳定至关重要，通过深入了解软土地质特性及其对基坑工程的影响，构建全面、科学的监测体系，运用先进的数据处理和分析方法，建立智能预警机制，并将监测成果有效应用于工程实践，同时不断优化监测工作，能够有效降低基坑工程风险，确保工程顺利实施。近年来，随着传感技术、物联网技术和数据分析技术的快速发展，深基坑监测技术也取得了显著进步，从传统的人工测量到自动化实时监测，从单一参数监测到多指标耦合分析，从经验判断到基于大数据和人工智能的智能预警，监测技术正朝着智能化、集成化和精准化方向发展，为应对软土地区深基坑工程的特殊挑战提供了新的解决方案。

### 参考文献

- [1] 软土地区复杂环境条件下基坑监测分析[J]. 颜荣华;朱明;郭玉君;戴郑新.江苏建筑,2022(02)
- [2] 基坑开挖对围护结构变形和坑外土体沉降影响研究[J]. 郭博瀚.陕西水利,2021(06)
- [3] 基于复杂环境下软土基坑开挖阶段的变形监测与分析[J]. 奚家米;丁卫锋;吴迪.科学技术与工程,2019(29)