

Geotechnical Engineering Investigation of Soft Soil Foundations

Kuo Jiang

China Ship Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shanghai, 200333, China

Abstract

Soft soil foundations are widely distributed in coastal plains and alluvial areas along rivers. Their high water content, high compressibility, and low strength characteristics pose numerous challenges for engineering construction. As a prerequisite for engineering design, geotechnical investigation faces technical difficulties under soft soil conditions, such as sampling disturbance, parameter variability, and long-term deformation prediction. Starting from the characteristics of soft soil engineering, this paper reviews the theoretical basis and methodological system of investigation work, analyzes key difficulties in sampling quality control, representation of spatial parameter variability, geological stratification, and stability prediction, and proposes measures to ensure quality, including optimizing investigation design, improving the testing supporting system, establishing multi-source data integrated analysis methods, and constructing a full-process quality control mechanism. These measures provide a reference for improving the quality of soft soil foundation investigations.

Keywords

Soft soil foundation; Geotechnical investigation; In-situ testing; Parameter variability; Quality control

软土地基的岩土工程勘察研究

蒋扩

中船勘察设计研究院有限公司, 中国 · 上海 200333

摘 要

软土地基在沿海平原及河流冲积地区广泛分布, 其高含水量、高压缩性以及低强度特性给工程建设带来诸多挑战。岩土工程勘察作为工程设计的前提环节, 在软土地基条件下面临取样扰动、参数变异以及长期变形预测等技术难题。本文从软土工程特性出发, 梳理勘察工作的理论基础与方法体系, 剖析取样质量控制、参数空间变异性表征、地质分层界定以及稳定性预测中的关键难点, 提出优化勘察方案设计、完善测试配套体系、建立多源数据综合分析方法以及构建全过程质量控制机制等保障措施, 为提升软土地基勘察工作质量提供参考。

关键词

软土地基; 岩土工程勘察; 原位测试; 参数变异性; 质量控制

1 引言

沿海地区经济发展带动了大规模基础设施建设, 软土地基条件下的工程问题日益凸显。这类土体形成于特定地质历史时期, 海陆交互沉积环境造就了其独特的物理力学性质——含水量往往超过液限, 孔隙比高达 1.5 甚至更高, 承载力却低得惊人。传统勘察手段在面对软土时常常遭遇困境: 钻探取样过程中土样结构破坏严重, 室内试验结果与现场实际状况出现偏差, 地层分布规律难以准确把握。这些问题不仅增加了勘察成本, 更可能导致设计参数选取失当, 进而影响工程安全。如何在软土复杂性与勘察经济性之间寻求平衡, 如何从有限的勘察数据中提取最大信息量, 成为岩土工程界持续关注的课题。本文尝试从理论到实践层面探讨软

土地基勘察的关键环节, 力图为勘察工作质量提升提供可操作思路。

2 软土地基岩土工程勘察的理论基础

2.1 软土的工程特性与成因机制分析

软土工程特性根源于其成因过程与沉积环境。滨海平原地区的软土多属海陆交替相沉积, 潮汐作用携带细颗粒在平静水域缓慢沉降, 有机质随之富集, 形成了高含水、高孔隙比的土体结构。这种结构极为脆弱——颗粒间联结主要依靠微弱的分子引力, 在外力作用下容易产生不可恢复变形。压缩性高是软土最显著的工程特性, 荷载施加后孔隙水缓慢排出, 固结过程可能持续数年甚至数十年, 地面沉降因此成为软土地区建筑物的常见病害^[1]。抗剪强度低则直接威胁地基稳定性, 基坑开挖或路堤填筑时若处理不当, 软土可能发生整体滑动破坏。灵敏度高意味着土体结构一旦遭受扰动, 强度急剧衰减, 这给施工带来额外风险。渗透性差导致固结速度慢, 也使得排水加固措施的效果打了折扣。掌握这些特

【作者简介】蒋扩 (1990–), 男, 中国安徽怀宁人, 本科, 工程师, 从事工程勘察研究。

性的内在关联机制，是制定合理勘察方案的前提。

2.2 软土地基勘察的基本原理与方法体系

勘察工作本质上是信息获取与处理的过程。软土地基条件下，地层结构往往呈现水平分布特征，但局部透镜体、夹层的存在增加了复杂性。钻探是最基础的勘察手段，通过岩芯观察可以初步判断土层性质与分布规律，但软土取样质量受钻进方式影响很大。静力触探利用探头贯入阻力变化反映土层软硬程度，在软土地区应用广泛，其连续性数据有助于识别薄层界面。十字板剪切试验直接测定原位不排水抗剪强度，避免了取样扰动对强度参数的影响^[2]。扁铲侧胀试验则能获得土体侧向变形特性，为水平向受力构筑物设计提供依据。不同方法各有侧重点——钻探提供地层框架，原位测试获取力学参数，室内试验补充物理指标，三者结合才能构建完整的地基信息体系。方法选择需要根据工程类型、场地条件以及经济成本综合权衡，大型工程往往采用多种手段交叉验证。

2.3 软土工程参数测试与获取的技术要求

参数准确性直接决定设计可靠性。软土含水量测定看似简单，但取样过程中水分散失会导致结果偏低，现场密封与快速运输成为关键控制点。压缩模量通过固结试验获得，加载等级划分、加载持续时间都需严格遵守规范要求，否则压缩曲线形态失真。抗剪强度参数获取更为复杂——不固结不排水试验模拟快速加荷条件，固结不排水试验考虑部分固结影响，固结排水试验反映长期强度特性，不同试验条件对应不同工程场景。渗透系数测定在软土中难度较大，常规变水头试验耗时且精度受限，改进型试验装置能够缩短测试周期。参数离散性是软土的固有属性，单点测试结果代表性有限，统计分析方法需要介入——标准值、特征值的确定要基于足够数量的试验数据，异常值剔除与分布规律识别需要专业判断。

3 软土地基岩土工程勘察的技术难点

3.1 软土取样与原位测试的质量控制问题

取样扰动是软土勘察最棘手的问题。薄壁取样器虽然能减少扰动，但贯入过程中仍会产生剪切应变，土样结构部分破坏。取样器直径、壁厚、刃口角度等设计参数影响扰动程度，钻进速度控制不当同样加剧破坏。运输过程中的振动、温度变化都可能改变土样状态，从现场到实验室的每个环节都存在质量风险。原位测试虽然避免了取样扰动，但测试结果受操作因素影响明显^[3]。静力触探贯入速度需保持稳定，否则孔隙水压力变化会干扰锥尖阻力读数。十字板试验中十字板插入深度、转动速率都需精确控制，插入过程本身就对土体产生扰动，休止时间不足会低估强度。设备标定与维护同样关键，传感器漂移、密封失效等故障可能长期存在却未被察觉。

3.2 软土参数的空间变异性与表征难题

软土参数在空间上呈现强烈变异性，同一层土在水平

方向上强度可能相差数倍。这种变异源于沉积环境的微小差异——水流速度略有不同就导致颗粒级配改变，有机质含量分布不均造成土质差异。有限的勘探点难以捕捉这种变异规律，两个钻孔之间的土层状况往往需要依靠经验推测^[4]。统计方法能够描述参数分布特征，但概率模型的建立需要大量数据支撑，常规勘察工作量很难满足。空间插值技术可以从离散数据推测未知位置参数，克里金法、反距离加权法各有假设前提，选择不当会引入系统误差。垂向变异相对规律性强，但软硬互层、透镜体夹层的存在打破了简单分层模式。如何用最少的勘探工作量获取最有代表性的参数，如何量化参数不确定性对设计的影响，都需要理论突破。

3.3 软土工程地质分层与界面识别困难

软土地层界面往往呈渐变过渡而非突变，物理力学性质连续变化使得分层界线难以明确划定。钻孔岩芯观察受主观判断影响，不同技术人员对同一土样的描述可能存在差异。静力触探曲线虽然连续，但在均质软土中阻力值波动不大，薄层夹层容易被掩盖。波速测试能够识别刚度变化界面，但软土波速普遍较低且差异不明显。地层对比面临更大挑战——钻孔间距过大时，同一层土的埋藏深度、厚度变化显著，单纯依靠深度对比容易出错。标志层的寻找与确认需要综合多种信息，颜色、颗粒组成、含水量、贝壳碎片等细节都可能成为判断依据。三维地质建模技术能够直观展现地层空间分布，但模型精度受控于输入数据质量，不恰当的插值算法会产生虚假界面。

3.4 软土长期变形与稳定性预测的不确定性

软土固结过程漫长，沉降预测需要准确掌握压缩参数与渗透特性。室内固结试验采用重塑土或扰动土，压缩曲线与原位状态存在偏差。分层总和法计算沉降时假设各层独立压缩，实际上相邻土层间存在相互约束。次固结沉降机理尚未完全阐明，经验系数法难以适用于所有土质条件。荷载施加速率、堆载历史都会影响沉降发展规律，在预测模型中难以全面考虑这些因素。稳定性分析同样充满不确定性——抗剪强度参数究竟选用总应力法还是有效应力法，不同规范给出的建议并不一致。渐近破坏过程中土体强度逐步发挥，传统极限平衡法假设所有点同时达到极限状态，这与实际情况不符。孔隙水压力分布受施工速率影响，快速加载与慢速加载的稳定性评价结果可能完全不同^[5]。

4 软土地基岩土工程勘察的质量保障措施

4.1 优化勘察方案设计与现场作业流程

勘察方案设计应当根据工程特点与场地条件量身定制。建筑物基础勘察关注承载力与沉降，勘探深度需到达压缩层底界；基坑工程则侧重稳定性与变形控制，勘探范围应覆盖可能的滑动面。勘探点布置不能机械套用规范最低要求，复杂场地应当加密布点。勘察阶段划分要清晰——可行性研究阶段侧重区域地质背景调查，初步设计阶段需获取主要地层参数，详细勘察阶段则要查明细部地质条件。现场作业流程

标准化能够减少人为失误，钻机就位后的水平校核、取样器使用前的检查、岩芯装箱时的编录都需按照规定程序执行。质检员随机抽查现场操作，发现违规行为立即纠正。恶劣天气条件下暂停作业，避免雨水进入钻孔污染土壤。

4.2 完善原位测试与室内试验的配套

体系原位测试与室内试验各有优势，合理搭配能够互补短板。静力触探提供连续剖面单参数间接，室内试验数据直接却受取样扰动影响，两者对比可以校验取样质量。十字板试验测得的原位强度与三轴试验结果存在系统差异，建立本地区经验关系式有助于参数转换。标准贯入试验在软土中贯入阻力很小，数据离散性大，但仍可作为地层划分的辅助手段。波速测试快速经济，用于初步判断土层软硬程度，异常值出现时再进行详细勘探。室内试验项目选择要有针对性——常规物理指标必测，力学参数根据设计需要确定，特殊土还需进行专项试验。平行样测试评估试验误差，结果偏差超出允许范围时重新取样。不同实验室间的比对试验能够发现系统偏差，促进测试水平提升。

4.3 建立基于多源数据的综合分析

评价方法单一勘察手段获取的信息总是片面的，多源数据融合能够还原地基真实状况。地球物理勘探快速获取大范围浅部地层信息，但分辨率有限；钻探精确但点位稀疏；两者结合可以用物探圈定异常区域，再用钻探验证。遥感影像揭示地表水系分布，历史上的河道、池塘位置往往对应软弱土层富集区。地方志记载的海陆变迁过程帮助判断沉积环境，为考古资料中的古建筑基础处理方式提供传统经验参考。数值模拟技术能够检验勘察成果的合理性，用有限元模型预测变形，若计算值与监测数据吻合较好说明参数选取可靠。贝叶斯方法将先验知识与现场测试数据结合，逐步修正参数估计，减少不确定性。专家经验虽然难以量化，但在处理复杂情况时不可或缺，组织多学科会审能够避免重大判断失误。

4.4 构建全过程质量控制与成果验证机制

质量控制应当贯穿勘察全过程而非仅停留在成果审查环节。方案编制阶段组织技术论证，避免设计缺陷；现场作

业期间实行旁站监督，关键工序留存影像资料；在室内试验过程中双人复核，异常数据追溯原因；报告编写时多级审核，技术负责人、审核人、审定人层层把关。成果验证可以采用多种方式——补充勘探验证可疑部位，邻近工程资料对比，施工揭露地层与勘察结果对照，基础施工后的载荷试验检验承载力，沉降观测验证变形预测。建立勘察质量信息反馈机制，将设计、施工过程中发现的问题及时反馈给勘察单位，作为技术改进依据。勘察资料长期保存并建立数据库，对区域地质规律的认识需要长期积累。引入第三方检测增强公信力，特别是重大工程应当强制执行。质量责任终身制促使从业人员增强责任意识，勘察报告签字人对成果质量承担法律责任。

5 结语

软土地基勘察工作的复杂性源于土体本身的特殊性质与工程需求的多样性。技术难点的存在不应成为降低勘察质量的借口，反而需要更加严谨的态度与更加精细地操作。质量保障措施的落实依赖于管理制度完善与技术人员素质提升，单纯依靠某一环节的改进难以根本解决问题。勘察成果最终要接受工程实践检验，设计合理、施工顺利、使用安全才是衡量勘察质量的根本标准。随着新技术不断涌现，软土地基勘察手段将更加丰富，但基本原理与质量意识永远不能丢弃。

参考文献

- [1] 蔡海涛.软土地基岩土工程勘察探究[J].中国地名,2025(7):0199-0201.
- [2] 冯建新.探讨软土地基岩土工程勘察要点[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(5):029-032.
- [3] 邵万强.基于软土地基的岩土工程勘察研究[J].中国地名,2025(9):0196-0198.
- [4] 张飞,霍伟大.湿陷性黄土地区岩土工程勘察与软土地基处理试验研究[J].中国新技术新产品,2024(1):91-93.
- [5] 张慧敏.软土地基岩土工程勘察与处理技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(12):066-069.