

软土地基加固机理及沉降控制研究

王 贺

中电建振冲建设工程股份有限公司 北京 102200

摘 要：软土地基因工程特性易出现沉降等问题。本文阐述了软土地基的基本工程特性，分析了换填法、排水固结法、深层搅拌法的加固机理，探讨了软土地基沉降的产生机制、主要影响因素及不均匀沉降的影响因素与危害。在此基础上，提出软土地基沉降控制措施，包括基于加固机理的技术优化，如换填法选材、排水固结法排水体布置等；施工过程中的沉降控制，如详细勘察、规范施工流程等；沉降监测与动态调控，如合理布置监测点、根据监测数据动态调控等。通过这些措施，可有效控制软土地基沉降，保障工程安全稳定。

关键词：软土地基；加固机理；沉降控制

引言：在各类工程建设中，软土地基是常见且需重点处理的地质类型。软土具有高压缩性、低强度等特性，导致地基易出现沉降、承载能力不足等问题，严重影响工程质量和安全。准确把握软土地基的基本工程特性，深入理解不同加固技术的机理，明确沉降产生机制及影响因素，是有效控制软土地基沉降的前提。基于此，本文围绕软土地基展开研究，旨在为工程实践提供科学依据和有效指导。

1 软土地基的基本工程特性

软土地基主要由淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土等高压缩性土层构成，其工程特性由软土的物理与力学性质共同决定，集中体现在含水量、孔隙比、抗剪强度、渗透性和压缩性五个关键方面，这些特性也是软土地基易出现沉降、承载能力不足问题的根源。（1）物理性质上，软土天然含水量高，普遍超 50%，部分甚至达 100%以上，远超液限。这使得软土颗粒间连接力微弱，结构松散，难以形成有效承载体系。其孔隙比大，一般大于 1.0，孔隙含量高且结构不规则，在荷载作用下，孔隙易被压缩，颗粒重新排列，引发较大沉降变形。同时，软土液限和塑限高，含水量变化时体积收缩和膨胀显著，加剧地基变形不稳定。（2）力学性质方面，软土抗剪强度极低，内摩擦角和粘聚力小，颗粒间摩擦与粘结力不足以抵抗外部荷载，易发生剪切破坏，导致地基失稳。其渗透性差，多为不透水或弱透土层，孔隙水难快速排出，荷载作用下孔隙水压力迅速升高，有效应力减小，进一步降低抗剪强度和承载能力，还延长固结时间，使沉降持续久。此外，软土压缩性高，压缩系数大、压缩模量小，相同荷载下压缩变形量远超普通粘性土地基，且沉降变形具时效性，分瞬时、固结和次固结沉降三阶段，沉降稳定耗时较长^[1]。

2 软土地基加固机理

2.1 换填法加固机理

换填法是最基础、最常用的软土地基加固技术，其核心机理是“置换补强”，通过挖除地基表层的软弱土层，回填强度高、压缩性低、渗透性好的材料（如砂石、碎石、灰土等），替换原有承载力不足的软土，形成新的持力层，从而提高地基的承载能力，减少沉降变形。换填法的加固作用主要体现在两个方面：（1）置换作用，将强度低、压缩性高的软土替换为强度高、压缩性低的回填材料，直接提升地基的承载能力，避免软土在荷载作用下发生过大压缩和剪切破坏；（2）排水作用，回填材料多为渗透性良好的粗颗粒材料，可形成有效的排水通道，加速地基深层软土的孔隙水排出，促进软土的固结，进一步提高地基的稳定性，减少次固结沉降。此外，回填材料经过分层压实后，颗粒排列紧密，孔隙率降低，压缩性进一步减小，能够有效控制地基的瞬时沉降和固结沉降，确保地基变形稳定^[2]。

2.2 排水固结法加固机理

排水固结法主要适用于饱和软粘土、淤泥质土等渗透性极差的软土地基，其核心机理是“排水+加压”，通过在软土地基中设置排水通道，结合施加预压荷载，加速软土中孔隙水的排出，降低孔隙水压力，提高有效应力，促使软土颗粒重新排列、密实，从而提高软土的抗剪强度和压缩模量，减少地基沉降。排水固结法的加固过程分为两个关键环节：（1）排水系统的设置，通过在地基中铺设砂垫层、砂井、塑料排水板等排水体，形成竖向和水平向的排水通道，打破软土的不透水特性，为孔隙水的排出提供路径；（2）加压系统的施加，通过堆载预压、真空预压等方式，向地基施加外部荷载，使软土颗粒受到挤压，孔隙水压力升高，在渗透压的作用

下, 孔隙水沿排水通道快速排出。随着孔隙水的不断排出, 软土的孔隙比减小, 颗粒排列更加紧密, 有效应力逐渐增大, 抗剪强度和压缩模量不断提升, 地基逐渐固结, 沉降量逐渐减小, 最终达到稳定状态。排水固结法的核心是通过加速排水, 缩短软土的固结时间, 同时提高软土的力学性质, 实现加固与沉降控制的协同效果。

2.3 深层搅拌法加固机理

深层搅拌法属于化学加固法的一种, 其核心机理是“化学反应+复合承载”, 通过搅拌机械将水泥、石灰等固化剂与软土强制搅拌混合, 使固化剂与软土发生一系列物理化学反应, 形成具有一定强度和稳定性的水泥土加固体, 与原有软土共同组成复合地基, 从而提高地基的承载能力, 控制沉降变形。深层搅拌法的加固作用主要分为三个阶段: (1) 物理混合阶段, 通过搅拌机械将固化剂与软土充分混合, 使固化剂均匀分布在软土颗粒之间, 打破软土原有的松散结构; (2) 化学反应阶段, 固化剂与软土中的水分发生水化反应, 生成水化产物, 这些水化产物会填充软土的孔隙, 将松散的软土颗粒粘结在一起, 形成牢固的颗粒连接, 增强软土的粘结力; (3) 复合承载阶段, 固化后的水泥土加固体强度远高于原有软土, 能够承担大部分外部荷载, 与桩间软土协同工作, 形成复合地基承载体系, 有效提高地基的整体承载能力, 同时减少地基的压缩变形和不均匀沉降。此外, 固化剂的掺入还能降低软土的含水量, 改善软土的渗透性, 促进软土的进一步固结, 提升地基的稳定性。

3 软土地基沉降的产生机制及影响因素

3.1 软土地基沉降的产生机制

软土地基沉降变形分三个阶段, 叠加形成总沉降量。(1) 瞬时沉降在外部荷载施加瞬间发生, 此时孔隙水未排出, 孔隙水压力瞬间升高, 有效应力不变, 沉降由软土颗粒弹性压缩和孔隙结构瞬时变形导致, 量小但速率快。(2) 固结沉降是主要部分, 占总沉降量 70% - 90%。荷载持续作用下, 孔隙水逐渐排出, 孔隙水压力降低, 有效应力增大, 软土颗粒被挤压密实, 孔隙比减小, 产生持续沉降。其速率与软土渗透性、排水条件相关, 渗透性好、排水通道完善, 沉降速率快、稳定时间短。(3) 次固结沉降在固结沉降基本完成后出现, 孔隙水基本排出, 有效应力稳定, 但软土颗粒在长期荷载下缓慢蠕变, 粘结力衰减, 产生缓慢沉降, 量小但持续时间长, 长期积累会损坏上部结构^[1]。

3.2 软土地基沉降的主要影响因素

影响软土地基沉降的因素主要有地基自身特性、加固技术参数和外部荷载三类, 相互影响决定沉降情况。

(1) 地基自身特性是根本因素, 涵盖软土含水量、孔隙比、抗剪强度和渗透性等。含水量高、孔隙比大, 软土结构松散、压缩性强, 沉降量大; 抗剪强度低, 加剧沉降不均匀; 渗透性差, 固结慢、沉降稳定时间长, 次固结沉降占比高。软土层厚度和分布均匀性也有影响, 层厚则沉降大, 分布不均易致不均匀沉降。(2) 加固技术参数是关键因素。换填法中, 回填材料强度、级配、压实度及换填深度影响承载能力和沉降; 排水固结法里, 排水体参数和预压荷载影响孔隙水排出和固结效果; 深层搅拌法中, 固化剂掺量等影响复合地基承载能力, 进而影响沉降。(3) 外部荷载是直接因素, 荷载大小、分布和施加速率影响显著, 荷载大、分布不均、施加速率快, 均会加剧沉降变形甚至致地基失稳。

3.3 不均匀沉降的影响因素及危害

不均匀沉降是软土地基沉降的主要隐患, 根源在于地基应力分布不均, 使各部位沉降量有差异。其主要影响因素有三: (1) 软土分布不均, 地基各部位承载能力与压缩性不同, 相同荷载下沉降量各异; (2) 加固技术实施不均, 像换填深度不一、搅拌不均、排水体分布不均等, 会让加固后地基各部位力学性质有别, 进而引发不均匀沉降; (3) 外部荷载分布不均, 如上部结构荷载不对称、局部荷载过大, 会使地基各部位应力差异大, 加剧不均匀沉降。不均匀沉降危害严重, 主要危及上部结构。当沉降差超出允许范围, 上部结构会产生附加应力, 出现开裂、倾斜, 严重时结构失稳, 无法正常使用。而且, 不均匀沉降还会使地基局部发生剪切破坏, 进一步增大沉降变形, 形成恶性循环, 严重影响地基整体稳定性。

4 软土地基沉降控制措施

4.1 基于加固机理的技术优化措施

加固技术优化是沉降控制的基础, 需依软土地基特性选合适技术并优化参数。不同加固技术优化方向不同。换填法优化有三方面: (1) 合理选回填材料, 优先用强度高、压缩性低、渗透性好的粗颗粒材料, 优化颗粒级配保证密实稳定; 优化换填深度, 结合软土层厚度与上部荷载确定, 避免浪费; 严格控回填压实度, 分层压实, 确保每层达设计压实度, 减少压缩变形。(2) 排水固结法优化围绕排水与加压系统: 优化排水体布置, 依软土层厚度、渗透性确定间距、深度与形式, 确保排水通畅; 优化预压荷载参数, 根据软土抗剪强度确定大小与施加速率, 避免失稳且促固结; 结合固结特性优化预压时间, 待软土固结达标再加载, 防沉降反弹。(3) 深层搅拌法优化: 依软土含水量、孔隙比优化固化剂掺

量,保强度且不浪费;提高搅拌均匀性,优化搅拌机械参数,防搅拌不均与断桩;依上部荷载分布优化加固体布置,保证复合地基承载力均匀,减少不均匀沉降^[4]。

4.2 施工过程中的沉降控制措施

施工过程是沉降控制的关键环节,施工操作的规范性直接影响加固效果和沉降变形,核心是通过科学的施工管理,控制施工过程中的各类影响因素,避免因施工不当导致沉降量增大或不均匀沉降加剧。(1)施工前需对软土地基进行详细勘察,全面掌握软土的分布范围、厚度、物理力学性质等参数,为加固技术选择和参数优化提供准确依据,避免因勘察不准确导致加固方案不合理,进而产生沉降隐患。(2)严格按照优化后的加固方案施工,规范施工流程,重点控制关键施工环节,如换填法的分层开挖与压实、排水固结法的排水体施工与预压加载、深层搅拌法的搅拌深度与固化剂掺量控制,确保施工质量符合设计要求。(3)需控制施工荷载的施加速率,施工过程中避免局部荷载过大、加载过快,采用分层加载、匀速推进的方式,减少荷载对软土地基的冲击,避免软土发生剪切破坏,同时为孔隙水排出提供充足时间,促进软土固结。施工过程中还需做好场地排水工作,避免雨水渗入软土地基,导致软土含水量升高、抗剪强度降低,加剧沉降变形。

4.3 沉降监测与动态调控措施

沉降监测是沉降控制的重要保障,核心是通过实时监测地基沉降量、沉降速率和不均匀沉降差,掌握沉降变形规律,及时发现沉降异常,采取针对性的调控措施,确保沉降变形处于允许范围之内。(1)沉降监测需结合工程实际,合理布置监测点,监测点应覆盖地基的关键部位,如荷载集中区域、软土层厚度较大区域、上部结构关键部位下方等,确保监测数据能够全面反映地基沉降情况。监测内容主要包括总沉降量、沉降速率、不均匀沉降差,监测频率需根据施工阶段和沉降速率调整,施工期沉降速率较快,监测频率应适当提高;沉降

稳定后,可降低监测频率,但需持续监测一段时间,确保沉降完全稳定。(2)根据沉降监测数据,及时进行动态调控:若监测发现沉降量过大、沉降速率过快,需暂停施工,分析原因,若为荷载施加过快,需减缓加载速率,若为加固效果不佳,需补充加固措施;若监测发现不均匀沉降差超过允许范围,需针对沉降较大区域,采取局部加固措施,如增设排水体、补充搅拌桩等,调整地基各部位的承载能力,减小沉降差异;若沉降达到设计稳定标准,可停止监测,进入上部结构施工阶段。通过沉降监测与动态调控,实现沉降的全过程控制,确保地基和上部结构的安全稳定^[5]。

结束语

软土地基沉降控制是工程建设中的关键环节,关乎工程的安全与稳定。本文全面探讨了软土地基的基本特性、加固机理、沉降机制、影响因素及控制措施。从加固技术的优化,到施工过程的规范操作,再到沉降监测与动态调控,每个环节都紧密相连、缺一不可。在实际工程中,需综合考量各方面因素,科学合理地选择加固技术和控制措施。随着技术的不断进步,未来还需持续探索更高效、更精准的软土地基沉降控制方法,以适应日益复杂的工程建设需求,为各类工程的顺利实施提供坚实保障。

参考文献

- [1]何敏,张华伟,陈航,王天成.考虑填筑过程的软基堤防破坏机制和沉降特性[J].人民长江,2025,56(S1):249-256.
- [2]张佳.穿越堤防管道工程沉降观测技术[J].河南水利与南水北调,2022,51(11):57-58.
- [3]白文彬.预制桩施工前淤泥软土地基处理研究[J].建筑技术开发,2024,51(09):152-154.
- [4]吴启华.建筑软土地基预制桩施工质量控制技术研究[J].中国建筑金属结构,2024,23(05):163-165.
- [5]张军菲,郑昆鹏,边晓亚.软土地基预制桩沉桩对桩周土体扰动研究[J].河南城建学院学报,2023,32(06):16-21.