

基坑施工中砂土抽水对土体位移影响分析

朱海峰

(中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510000)

摘要 在基坑施工过程中, 砂土抽水对土体位移具有显著影响, 其作用机制复杂且受多种因素制约。本文从孔隙水压力变化、砂土颗粒重排及渗透力效应出发, 系统分析砂土抽水导致土体位移的机理, 并结合抽水参数、土体性质及基坑支护条件等因素进行影响分析。针对砂土抽水过程中位移的监测方法, 提出基于孔隙水压力传感器、倾斜计及全站仪监测的技术方案, 并提出优化抽水方案、土体加固及支护措施等控制策略, 以为相关人员提供有益参考。

关键词 基坑施工; 砂土抽水; 土体位移; 孔隙水压力; 渗透力

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.002

0 引言

在城市深基坑施工过程中, 砂土层因透水高、颗粒散而成为施工关键控制对象。砂土抽水会降低地下水位, 确保基坑施工干燥以及施工机械作业条件, 但会引发土体结构调整和位移, 严重时致使周边建筑沉降、管线损坏乃至基坑失稳。近年来, 随着城市建筑密度增添以及基坑开挖深度加深, 砂土抽水对土体位移影响问题越发显著, 抽水速率超 $0.1 \sim 0.3 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ 时, 基坑周边土体能够产生 $10 \sim 30 \text{ mm}$ 不均匀沉降情况; 抽水持续时间超 30 天的时候, 孔隙水压力降低超 60%, 土体有效应力明显增大, 颗粒重新排列致使沉降量能达到 25 mm 以上。本文分析砂土抽水对土体位移的作用机制, 结合影响要素和监测技术, 为深基坑施工提供系统控制方法参考。

1 砂土抽水导致土体位移的作用机制

1.1 孔隙水压力变化与土体有效应力调整

在砂土抽水过程中, 地下水位下降, 同时土体孔隙水压力下降, 让土颗粒间有效应力变大, 依据 Terzaghi 有效应力原理, 土体总应力 σ 由有效应力 σ' 以及孔隙水压力 u 构成 ($\sigma = \sigma' + u$)。以松散中砂为例, 当地下水位降 1 m 时, 孔隙水压力下降约 9.8 kPa , 对应有效应力增大, 颗粒间摩擦力增强, 进而提升土体承载能力, 有效应力增加随着土颗粒重新排列还有微量沉降^[1]。在长时间抽水情况下, 特别是在基坑或周边软土区域, 孔隙水压力分布不均会产生局部土体剪切变形, 坑底和周边地表出现不同沉降, 沉降梯度能达到 $2\% \sim 5\%$ 。施工时若抽水速度太快或降水区域聚集, 会加大土体非均匀沉降风险, 所以要分区抽水, 还要

调控抽水速度, 把孔隙水压力梯度控制在安全范围内。

此外, 抽水时土体应力调整时效性和抽水持续时间关联紧密。砂层厚度超 6 m 并连续抽水超 30 天, 孔隙水压力降低能到 $60\% \sim 70\%$, 土体有效应力明显增大, 局部沉降累计能到 $15 \sim 30 \text{ mm}$, 在施工设计阶段, 可结合地质勘察数据和数值模拟 (如 PLAXIS 或 FLAC3D) 剖析基坑周边应力分布情况, 把控抽水井安排以及抽水速度, 实现降水和土体应力调整同步, 减少坑底和边坡土体不均匀沉降风险。

1.2 砂土颗粒的重新排列与变形

砂土颗粒散、孔隙率高, 抽水时孔隙水压力下降会让颗粒相互接触并重新排列, 以典型中砂为例, 颗粒比重约 2.65, 直径 $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$, 孔隙率约 35%, 孔隙水压力降低致使颗粒自身沉降, 出现 $0.5\% \sim 1.5\%$ 的体积收缩, 同时伴有微小剪切变形。这种重新排列不光影响基坑底板沉降, 也会致使坑边土体出现水平位移, 特别是砂层厚度超 8 m 时, 底板下沉能到 $20 \sim 40 \text{ mm}$, 在施工中, 要结合土工实验来确定砂土压缩模量和固结特性, 为支护结构设计提供量化依据。

在长期抽水情形下, 颗粒重新排列也会引发局部孔隙率改变, 改变土壤渗透能力以及剪切强度, 影响支护结构受力。当砂层孔隙率从 35% 降低到 32% 时, 局部有效应力增加约 $10 \sim 15 \text{ kPa}$, 使支护桩承载的荷载提高, 同时坑壁位移增加量约 $5 \sim 8 \text{ mm}$ 。因此, 在施工设计中, 要考虑颗粒沉降对支护荷载的额外影响, 通过分区抽水、把控降水速率以及必要砂土加固举措 (如砂砾滤层或注浆), 降低颗粒重排引发的位移和应力变化, 确保基坑整体稳定性。

1.3 渗透力对流砂、管涌现象及土体稳定性的影响

在抽水过程中,水流穿过砂层生出渗透力,渗透力超过土颗粒间摩擦力时,能引发局部流砂或管涌现象,依据 Darcy 定律,渗透流速 $v=k \times i$,其中 k 是渗透系数,中砂 $k \approx 1.0 \times 10^{-4}$ m/s。坑底水力坡度 $i > 0.02$ 时,渗透力能移动细颗粒,致使底部或坑壁局部松垮,施工时若未采取砂砾滤层或帷幕注浆控制,管涌可能在坑壁和支护桩接触处出现,使土体承载力降低、位移变大,沉降梯度能达到 5% 以上,给周边建筑安全造成威胁。

此外,渗透力作用强弱受抽水速度、砂层厚度以及水位变化程度影响。当砂层厚度是 6 ~ 10 m、抽水速率控制在 $0.2 \sim 0.3$ m³/h · m² 时,渗透力可使颗粒移动能维持在安全范围内,局部沉降约 10 ~ 15 mm。施工时能够结合数值模拟来评估渗透力分布情况,布设抽水井与滤层,实现降水均匀化,同时在坑底以及坑壁设加固或隔水层,降低管涌和流砂风险,保证砂土抽水时土体位移能控制住。

2 基坑砂土抽水时土体位移的影响因素分析

2.1 抽水参数的影响

抽水量、抽水速度以及抽水井布设密度是影响砂土基坑位移的关键参数。在基坑施工中,合理布置抽水井并控制抽水速率,能有效减小孔隙水压力梯度,降低土体沉降以及坑壁位移。以典型 8 m 厚中砂层为例,采用抽水井间距 3 ~ 5 m、井深到砂层底部的分区抽水办法,能把坑底和边坡位移控制在 10 ~ 25 mm 范围内,抽水速度超 0.3 m³/h · m² 时,基坑底板沉降增量能比设计速率增大 1.5 倍,坑周边 0 ~ 10 m 范围沉降能累计达 20 ~ 30 mm^[2]。此外,连续抽水时长超 20 天时,砂土孔隙水压力降超 50%,局部沉降加剧,表明抽水时间和速率对土体位移存有累积效应。表 1 显示,随着抽水速度和持续时长增长,坑底和周边土体沉降显著增大,表明抽水参数对砂土基坑位移有明显累积作用。

表 1 抽水速率与沉降关系

抽水速率 (m ³ /h · m ²)	抽水时间 (天)	坑底位移 (mm)	坑周边沉降 (mm)
0.1 ~ 0.2	10	5 ~ 10	5 ~ 15
0.2 ~ 0.3	20	15 ~ 25	10 ~ 25
> 0.3	30	25 ~ 40	20 ~ 35

在施工过程中,抽水井布置不均或抽水速度波动致使孔隙水压力分布不均,造成局部高压或低压区,引发土体过度沉降和坑壁倾斜。为此,要结合地质勘察数据和水文条件,制订分区抽水规划,并配备自动水

位监测系统,实现抽水量以及速率的动态调控。例如:在中砂层渗透系数是 1×10^{-4} m/s 的情形下,采用间歇式抽水,每天抽水 8 ~ 10 h,能把孔隙水压力梯度控制在 0.01 ~ 0.02 内,进而有效把控坑底沉降以及坑边坡位移,保证施工安全。

2.2 土体性质的影响

砂土密实程度、含水量、颗粒构成以及渗透系数直接决定了抽水引发的土体位移特性。松散中砂孔隙率约 35%,渗透系数约 1×10^{-4} m/s,密实砂孔隙率约 30%,渗透系数降低至 5×10^{-5} m/s^[3]。在一样的抽水条件下,松散砂沉降量比密实砂高出 1.5 倍,表明土的密实程度对沉降控制有着重要作用。砂土含水量每添 5%,在降水 1 m 的情况下,有效应力增量可降低 4 ~ 6 kPa,沉降减缓,可长期抽水仍会引发颗粒重新排列以及局部压缩变形。施工设计要经标准土工试验(如孔压计固结试验、颗粒密度测试)得到砂土力学参数,并结合数值模拟预估土体位移走向。

粒径分布宽的砂土层抽水后易出现局部沉降集中情况,增加不均匀沉降风险。例如:中砂层夹含 5% ~ 10% 细颗粒(直径 < 0.075 mm)的时候,局部沉降比均匀砂层增多约 30%,坑壁位移也可累积 5 ~ 8 mm。

2.3 基坑支护与周边环境的影响

基坑支护结构类别、桩间距以及施工质量,对抽水引发的土体位移有着明显调节作用。在钢板桩支护中,桩间距控制在 600 ~ 800 mm 范围时,坑边最大沉降能控制在 25 mm 以内;若桩间距太大或桩连接未立刻做完,部分土体容易出现流砂或管涌,沉降量能够增添 50% 往上。在深基坑施工中,坑壁倾斜程度每增加到 1/500,坑边沉降累计 5 ~ 10 mm。因此,支护结构设计要充分考虑抽水给边坡土体应力带来的附加作用,施工中确保桩体垂直度与连接质量。

周边环境状况同样影响土体沉降特性,地下管线、建筑荷载以及地表交通荷载会对土体产生约束,使抽水引发的沉降呈不均匀分布。例如:当基坑周边建筑荷载是 15 ~ 20 kPa 的时候,坑边沉降比空旷地区增加约 20%,沉降梯度不均匀,局部会出现沉降差别,可达 5 ~ 8 mm。

3 砂土抽水过程中土体位移的监测方法

土体位移监测是基坑施工安全管理的核心环节,能及时发现抽水引发沉降及坑壁位移特点,常用办法包含水准测量、倾斜仪监测、孔隙水压力计以及地表沉降观测。在施工中,在基坑周围每隔 5 ~ 10 m 设置水准点,用 0.1 mm 精度水准仪每天测沉降变化;坑壁每隔 2 ~ 3 m 布置倾斜仪,实时监控坑壁倾斜度,

累计倾斜超 1/500 时触发报警;孔隙水压力计安放在砂层中间和底部,精准度 0.05 m,能够监测孔隙水压力动态改变^[4]。实现连续性与高时效性,施工时常采用自动化数据采集系统,搭配地下水数值模拟(如 MODFLOW 或 PLAXIS 模拟孔隙水压力分布情况),剖析土体应力以及位移发展趋向,进而给分区抽水调控、支护加固以及施工方案优化供给科学依据,实现土体位移精准管理以及施工安全保障。

4 降低砂土抽水对土体位移影响的措施

4.1 优化抽水方案

管控抽水速度、井位安排以及分区抽水是砂土基坑施工中降低土体位移风险的关键办法。在实际施工中,能采用间歇抽水或分区抽水办法,把单井抽水量控制在 $0.1 \sim 0.2 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$,防止孔隙水压力突然降低致使颗粒重新排列。抽水井间距通常布置 3~5 m,井深直至砂层底部,在边坡设置缓降带和辅助排水井,以保证降水均匀,减少局部渗透力集中的风险,用数值模拟软件(如 MODFLOW 或 PLAXIS)能够精准剖析孔隙水压力分布以及流向,为抽水井深度和布置提供科学依据。

在抽水施工中,还需结合现场水位监测数据动态调整抽水速率和顺序,对于砂层厚度超 8 m 的深基坑,可采用分层抽水,每层间隔 2~3 m,设置分区阀控井,确保持续降水且防止局部快速下降超 0.05 m/天。同时,边坡缓降带能联合微型井或排水沟引领地下水流向,降低渗透力集中地方,让抽水速度、孔隙水压力和土体应力变化维持相对平衡,施工操作时要记抽水流量、井压以及地下水位变化,作为土体位移预测和调整依据。

4.2 土体改良与加固措施

通过注浆固化剂、搅拌桩加固以及砂砾滤层布设提升土体承载能力,注浆操作时,砂土注浆压力把控在 0.8~1.2 MPa,注浆孔间距 1~1.5 m,注浆量依孔体积的 80% 注入,确保均匀加固且不引发土体隆起^[5]。搅拌桩直径通常是 500~800 mm,桩距 1.2~1.5 m,利用机械搅拌把砂土和水泥浆充分混合,提高颗粒间结合力,降低抽水时颗粒重新排列的潜在位移,砂砾滤层布设厚度 0.3~0.5 m,颗粒大小控制在 10~30 mm,用于坑壁和底板边缘渗透水过滤以及支撑颗粒,降低局部渗透力影响。

针对坑底薄弱砂层,需在底板下设置混凝土垫层或碎石垫层,厚度通常是 0.3~0.5 m,散开荷载并提升底部稳固性,施工要配合地质勘察结果以及原位密实度测试,确定加固区域和加固深度,同时监测注浆压力和沉降变化,保证土体改良匀称。搅拌桩施工可

用分层逐段往下沉的办法,每层厚度 0.8~1 m,施工完后进行孔隙率和承载力复测,为后续抽水作业提供可靠数据。

4.3 加强基坑支护与监测

钢板桩或混凝土支护桩要保证桩间间隙小于 200 mm,在坑壁设排水板和砂砾滤料来分散渗透力,支护桩长度通常控制在基坑深度加 2 m,确保底部稳固性,施工要采用水平拉杆或支撑梁连接桩体,保证桩体整体刚度以及连续性。在监测方面,坑壁每隔 2~3 m 布置倾斜仪,沉降监测点间隔距离为 5~10 m,且在砂层底部布置孔隙水压力计,精度分别是 0.05 m 与 0.1 mm,以实时把控土体应力和位移变化。

基坑施工可结合 BIM 和数字化监控平台,把抽水系统、支护结构以及监测数据进行联动管理,系统能设置预警阈值,沉降或倾斜超设计限值时自动触发施工调整,如减少抽水量或增添支护加固办法。在施工中,每天要记抽水流量、孔隙水压力以及支护结构受力变化,结合历史数据剖析位移发展趋向,实现抽水同支护监测的动态平衡。

5 结束语

本文分析了砂土抽水对基坑土体位移的作用机制,指出孔隙水压力变、颗粒重排及渗透力作用是其主要影响因素,并结合抽水参数、土体性质及支护条件等进行了详尽的因素剖析,针对抽水引发位移的控制,提出优化抽水法子、土体改良加固以及加强支护和监测的综合举措,且明确具体参数设计和操作方法。研究表明,通过精准把控抽水速度、妥善安排支护架构并开展动态监测,能实现对砂土抽水致使的土体位移的科学管理,给深基坑施工提供技术参考。

参考文献:

- [1] 聂敏昌.建筑深基坑开挖过程中土体位移的实时监测技术[J].城市建设,2025(21):59-61.
- [2] 王云燕.富水砂土基坑开挖前降水引起的变形及其控制研究[D].福州:福州大学,2023.
- [3] 陈龙.深基坑降水对泵站周边土体位移的影响及控制技术[J].广东建材,2025,41(10):83-86.
- [4] 刘羽,王科,胡威,等.软黏土桩锚加撑组合支护基坑土体深层水平位移监测分析[J].建筑结构,2025,55(14):145-150.
- [5] 王雅平,王旭东,罗东娜.含水层砂土压缩变形特性及数学描述[J].南京工业大学学报(自然科学版),2019,41(04):480-485.