

地下水对软土地区地基承载力的影响机理探讨

文 / 刘煜韬 江西省地质局水文地质大队

摘要: 为了探讨地下水对软土地基承载力的影响机制,提升工程稳定性,本文分析了软土物理力学特性及其与地下水的相互作用,基于有效应力原理和剪切强度退化模型,揭示地下水位上升、孔压滞散等因素对地基承载力的削弱效应。工程实例表明,地下水是导致软土承载力下降的关键因素。建议通过排水固结、降水井布设、化学加固与信息化监测等手段,提升地基稳定性,特别适用于滨海及高地下水位区域。

关键词: 软土地基; 地下水; 有效应力; 孔隙水压力; 承载力控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.010

引言

软土广泛分布于滨海、河口及冲积平原,因其结构性差、压缩性高、抗剪强度低,常为地基工程难点。地下水作为关键环境因素,其波动与渗流直接影响地基承载力与沉降稳定性,传统设计中常被忽视。本文基于软土特性,分析地下水通过孔压、固结与强度变化等路径对承载力的影响机理,并结合工程实例提出控制与加固策略,旨在为软土地基工程提供理论依据与技术参考。

一、软土地区地基的基本特性分析

(一) 软土的物理与力学性质

软土往往含水率在60%以上、孔隙比大于1.5、天然抗剪强度低于20kPa、压缩系数 m_v 超过 0.3MPa^{-1} ,显示出明显具有的高压缩性及低强度,这类弱结构性土体在静水环境下即达临界稳定状态,受外荷载或地下水扰动影响,极易出现塑性变形与侧向的流动,引发承载能力迅速下滑,在工程实际开展的时候,只要软土进入饱和或差不多饱和状态,结构骨架将呈现失稳态势,抗剪能力急剧削弱,造就承载“薄弱地带”。

(二) 地下水对软土结构性的削弱

地下水渗透进入软土结构后,最先把土粒之间的吸附力给破坏了,进一步对已有的弱胶结作用加以削弱,使得原本就有限的结构强度急剧下降,不断流淌的孔隙水诱发土体内微观结构重新搭建和空隙重新分布,造成次生压缩性的沉降,引起其稳定性下滑,此过程一般是持续的且不可逆转,尤其在长期高水位这种状态的作用下,软土将形成“剪切薄弱区”,地基整体承载能力出现明显下滑,乃引发地基不均匀沉降及局部滑移的根源之一。

(三) 软土地基的渗透与固结特性

软土渗透系数大多介于 $10^{-9} \sim 10^{-7}\text{m/s}$ 之间,孔隙水的排出慢到了极点,加载步骤进行的阶段,因孔隙水压力未能及时消散,引起有效应力提升呈现迟缓状,不

利于土体强度的充分发挥,甚至造成土体结构性的延迟性破坏,尤其是当土层内夹杂了粉质粘土或黏性夹层时,容易构建起“封闭水袋”,局部的孔压持续急剧地升高,引发集中沉降及剪切失稳,减弱整个承载系统的均衡特性,增加结构工程长期面临沉降和失稳的风险水平。

二、地下水对软土地基承载力的影响机理

(一) 有效应力原理下的地下水影响路径

根据Terzaghi有效应力原理,地基土的抗剪能力取决于有效应力 σ' ,其定义为:

$$\sigma' = \sigma - u$$

其中, σ 为总应力, u 为孔隙水压力。当地下水位渐趋上升的时候,孔隙水压力随之上扬,引发有效应力弱化,造成土体的抗剪强度下滑,结果造成地基承载力减弱,尤其是在富含水的软土地层里面,波动的地下水直接对应力分布状态加以改变,或许会诱发局部的滑移、沉降以及结构不均匀形变,水位下落可造就负孔压,加大土体的吸附力,推动 σ' 值上升,利于增强地基的承载强度,地下水借助有效应力路径对软土地基承载能力实施“动态调控”,尤其在降雨的季节以及施工抽水阶段,影响显著程度更高。

(二) 孔隙水压力变化导致的承载力衰减

若地基的加载速度比孔隙水排出速率大时,土体里孔隙水不断积聚,引发滞后现象,短期内无法马上消散,造成有效应力维持低水平状态,承载力体现为“延迟增长”情形,该现象于软土里表现得尤为明显,尤其是采用快速施工方法或进行大荷载集中加载之际。像在某软土试桩相关工程里,刚开始加载,桩基承载力只达到理论设计值的60%,三天时间里自然孔压消散后,承载力渐次回升至设计值的90%以上,呈现出典型的“延时固结”现象,这类滞后变化使地基失稳的风险显著提升了,施工当中若未设置适应性排水机制,将明显加剧工程沉降与开裂问题出现的风险。

(三) 地下水引发软土剪切强度的变化

软土剪切强度受有效应力影响显著,其计算公式为:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

其中, c' 为有效粘聚力, ϕ' 为有效内摩擦角。地下水入渗后,软土孔隙饱和,胶结结构破坏,导致 c' 显著下降,甚至接近于零, ϕ' 也随孔压上升而降低,使整体 τ 值明显下滑。以某含水分质粘土层为示例,原始状态里, ϕ' 取值为 20° , 饱和状态下降低到 12° , 哪怕在这个时候总应力不变,有效应力的减小亦能诱发滑动面出现或剪切破坏,此剪强急剧下降的敏感特性,在港口、围海造地这类高水位的工程情况里最为多见,是引发软土地基承载能力突变的关键机理,设计应引入

动态监测与应力状态调节机制从而规避相关风险。

(四) 地基固结过程中的地下水作用

核心过程——地基固结助力承载力发展,地下水经由控制排水速率与孔压的改变而影响固结效率,若固结排水路径被阻断掉,孔隙水长久地滞留,引起沉降持续增大,承载力成长迟缓,一个典型案例源自某沿海城市的商业高层建筑项目,于降雨季节,地表水渗入下沉,引起地下水位增高,沉降速率自 2mm/月 升至 8mm/月 水平,累计沉降量高达 180mm 之多,超过了既定的标准极限,此过程显示地下水渗入对长期沉降的控制效果不佳,尤其是在高填土、深基坑、弱排水性土层这些情形下,需格外警惕。详情见表 1。

表 1 工程中不同阶段沉降速率与累计沉降数据 (单位: mm)

时间阶段	地下水状态	月沉降速率	累计沉降值
干旱期 (4 个月)	地下水位稳定	2	8
雨季前期 (2 个月)	地下水上升 10cm	5.2	10.4
雨季中期 (3 个月)	地下水持续上升	8.1	24.3
雨季末期 (3 个月)	水位高位滞留	7.6	22.8

三、软土地区承载力提升的控制策略

(一) 采用排水固结措施加快有效应力形成

鉴于软土天然含水率高、渗透系数小、固结进程缓慢,以天然状态而言难以达成承载力需求,为优化其力学性能,于工程而言,常凭借加快有效应力生成的手段改善其结构,垂直排水板配合真空预压这种复合排水固结方式已相对成熟,该策略借助在软土地层中布置塑料排水带,促进孔隙水迅速横向排出,然后借助真空负压系统构建等效荷载场,以此让固结周期缩短、提升地基的承载强度。真空度、排水间距及土层压缩系数和有效应力增长率密切相连,基于预压加载条件一致的前提,可把常规自然排水的固结度从 $0.3-0.4$ 提升至 0.85 之上,高

效缩短工程实施周期,尤其在诸如港口、厂房的大型地基处,复合排水系统体现出显著的技术及经济优势。

就以上海南汇的某物流基地工程为例证,施工区域原状的那层土是 $4-9\text{m}$ 厚的淤泥质粉质粘土,原状下天然含水率为 $55\%-65\%$,液限近似为 60% ,项目按 2.5m 的间隔设置塑料排水带,然后在地表敷设真空膜布形成真空预压系统,实际施加的真空度维持在差不多 85kPa 。以 100kPa 为预压荷载,持续加载 90 天的时候,基于孔压计、沉降板监测数据实施分析,结果表明目标深度处孔压消散率达 92% 以上,等效地基承载力最终从 62kPa (原始值) 提升至 148kPa ,软土地层平均固结后沉降量为 31cm ,符合大型仓储荷载的要求。详情见表 2。

表 2 排水固结法改良前后软土工程参数变化对比

参数名称	原状土层 (未处理)	排水固结后 (90 天)
液限 (%)	60	58
含水率 (%)	63.4	46.2
压缩系数 (a_{1-2}) (MPa^{-1})	0.58	0.31
地基承载力 (kPa)	62	148
孔压消散率 (%)	<40	>92

(二) 地下水控制技术——设置降水井或导排沟渠

在软土区域实施工程建设的过程里,地下水位的有效控制对地基承载力有决定性意义,由于有地下水,地基会进入饱和状态,由此造成有效应力下降,引起滑移、隆起情况或者不均匀沉降,采用降水井、导排沟渠形成控制架构,依靠降低地下水位来达成,促使基底处在非饱和与半饱和状态,有利于增强地基的稳固性与强度。

在诸如基坑开挖、高架桥桩基础、地铁盾构之类的工程当中,普遍采用围井降水与帷幕止水相组合的方案,减少周边渗流对施工区域形成的影响,此策略于基坑降水作业期间,需依照渗透系数 k 值、开挖深度 H 连同降水影响半径 R ,恰当地设定降水井的数量、间距与抽水量,进而使孔隙水压力不出现急剧的突变。

用天津滨海新区某地铁基坑工程作示例,该地域地

下水位高达 1.2m 呢，地层主要构成是 6m 厚的饱和淤泥，工程设计让基坑深度达到 8.5m，采取多级围护跟封闭降水联合的方法：搭建三圈降水井，外圈所布降水井深 12m，将单口井的出水量控制于 18 ~ 22m³/h 范围，进行为期 50 天的连续降水，地下水位下探至基底之下 2.5m，实时监测数据呈现出，施工进度内，基底孔压由 48kPa 下降至 22kPa，地基有效应力由初始的 89kPa 提高为 146kPa，合理控制了基底隆起及侧壁稳定的情况，保障基坑未出现滑动造成的破坏。详情见表 3。

表 3 降水措施前后地基孔压与承载力变化

参数名称	降水前	降水后
地下水位 (m)	-1.2	-3.7
基底孔隙水压 (kPa)	48	22
有效应力 (kPa)	89	146
基坑周边位移 (mm)	12.6	4.8
地基承载力 (kPa)	97	165

(三) 化学加固与注浆提升软土强度

处于地下水充裕的软土区域，常规的排水固结方式偶尔难以满足高承载力及快速施工的要求，因而有必要采用化学加固或注浆办法直接改变土体结构，诸如水泥土搅拌桩、硅酸盐高压注浆、环氧树脂高压喷射之类的手段，都可在短时间提高土体抗剪及抗压的强度，以此明显增强其承载水平，把这些材料注入软土之后，凭借化学反应构建稳定的胶结体，重塑土粒结构、降低孔隙占比、提升密实程度与抗渗能力，尤其适合地下水活跃且施工周期短促的区域。

好比在厦门翔安某高速互通项目里，路基下部呈现出 5-8 米厚的饱和粉质黏土，初始的地基承载力仅大致是 55kPa，项目采用水泥土搅拌桩法加以处理，桩身直径 600 毫米，采用 32.5R 水泥，调配时水灰比 0.8，凭借专用搅拌设备原位搅拌造就桩体，按 1.2m×1.2m 间距把桩作梅花形排列，28 天固化阶段结束后，利用室内无侧限抗压试验及现场静载试验予以验证，桩周改良区域其平均抗压强度为 260kPa，地基变形模量从先前的 6.2MPa 上升至 19.4MPa，大幅提高了承载水平，符合大跨桥墩处荷载传递规定。

(四) 信息化监测系统用于地下水-地基耦合监控

地下水跟地基变形之间体现出高度耦合的关联，若不能在实时状态下掌握其动态特性，极有引发结构沉降、滑动以及突发失稳之虞，信息化监测系统把孔压计、沉降板、倾斜仪、应变计、渗压传感器等多种设备整合在

一起，能全方位捕捉地下水位的变化态势、孔隙水压力的演变过程与地基的响应现象。搭配 GIS 或 BIM 等平台达成数据的可视化，可在早期阶段对异常应力集中或水文突变现象预警，从而迅速干预施工手段，强化施工的安全水平，当下主流监测系统可实现数据远程上传、自动预警、趋势回归分析以及响应策略拟定，适合应用在地铁、桥梁、深基坑等对地基稳定性要求极高的情形中。

就天津某跨河大桥改建工程举例，地基处于软粘土与淤泥质粉土相互层叠的地段，项目在桥台区安排了 18 个孔压计、12 个倾斜仪，再加上 GPS 沉降监测桩与无线应力监测终端，构建依托 GIS 平台的全周期监测体系，在汛期前后，系统识别到地下水位异常抬升，继而出现承载力下降趋势，监测得出桥台区孔压上升至 36kPa，承载力降低了差不多 20%，施工方按照此情形推迟上部结构施工，顺势调整了排水系统，有效避免桥台出现沉降与差异性变形，保障施工阶段结构的稳定性。

结语

地下水通过调控孔隙水压力、削弱土体结构性及延缓固结进程，对软土地基承载力产生显著不利影响。其主要作用机制体现为有效应力减小、抗剪强度降低及沉降增加，工程上若未加以控制，极易引发结构沉降不均、边坡滑移等失稳问题。针对上述问题，应结合地基实际情况，综合运用排水固结、降水控制、化学加固与信息化监测等技术手段，有效提升软土地基的承载性能与施工安全性。尤其在地下水水位或滨海软土区，应将地下水动态影响作为设计与施工阶段的重要考量因素，以实现基础工程的长期稳定运行。

参考文献

[1] 吴斌. 软土地区复杂地质环境下基坑工程地下水控制方法研究 [J]. 建筑施工, 2024, 46(11): 1848-1851+1860.

[2] 何政宇, 刘刚, 徐成华, 等. 软土区建筑荷载和地下水开采引发的地面沉降模拟预测 [J]. 勘察科学技术, 2024, (04): 36-43.

[3] 姚武松. 软土地区深基坑多层地下水处理措施分析 [J]. 安徽建筑, 2023, 30(12): 145-146+158.

[4] 魏祥, 梁志荣, 罗玉珊. 软土地区临江深大基坑工程地下水综合控制技术实践 [J]. 上海国土资源, 2022, 43(04): 39-43+66.

[5] 张弛. 软土地区超大深基坑开挖中的地下水控制技术 & 工程案例 [J]. 工程与建设, 2021, 35(06): 1238-1239+1244.