

水利施工中软土地基施工技术探讨

蒋霖¹ 王萌伟² 余岷洋¹

1. 中建八局西南建设工程有限公司 四川 成都 610041

2. 郑州市水利工程监理中心 河南 郑州 450007

摘要: 软土地基因其高压缩性、低强度、高含水量及流变特性,在水利工程施工中极易引发沉降、滑坡、失稳等工程问题,严重威胁水利工程的安全性与耐久性。本文系统分析了软土地基的基本工程特性及其对水利工程施工带来的主要挑战,重点探讨了当前常用的软土地基处理技术,包括换填法、预压排水固结法、强夯法、深层搅拌桩法、高压旋喷桩法、碎石桩法以及土工合成材料加固法等,并结合实际工程案例对其适用条件、技术要点及优缺点进行了比较分析。在此基础上,提出了软土地基处理技术的发展趋势与优化建议,强调应根据具体工程地质条件、结构功能要求及经济环保因素进行多方案比选和综合应用,以实现安全、高效、可持续的水利工程建设目标。

关键词: 软土地基; 水利工程; 地基处理; 施工技术; 沉降控制

引言

随着我国水利基础设施建设的不断推进,越来越多的水利工程项目(如堤防、水闸、泵站、水库大坝、渠道等)不可避免地需要在沿海、河湖冲积平原、沼泽湿地等软土分布区域进行建设。软土通常指天然含水量高、孔隙比大、压缩性强、抗剪强度低且具有显著流变特性的黏性土,主要包括淤泥、淤泥质土、泥炭土及部分饱和粉细砂层等。这类地基在荷载作用下易产生较大且不均匀的沉降,甚至发生整体失稳,对水利工程的结构安全、运行稳定及使用寿命构成严重威胁。因此,如何科学、有效地处理软土地基,成为水利工程施工中的关键技术难题之一。近年来,随着岩土工程理论的发展与施工技术的进步,多种软土地基处理方法被广泛应用于实际工程中,并取得了显著成效。然而,不同处理技术在适用范围、处理效果、施工周期、经济成本及环境影响等方面存在较大差异,需结合具体工程条件进行合理选择与优化组合。

1 软土地基的工程特性及其对水利施工的影响

1.1 软土地基的基本特性

软土地基在物理力学性质上表现出一系列显著特征,这些特征共同决定了其在工程应用中的不利地位。首先,软土普遍具有极高的天然含水量,往往超过其液限,孔隙比也常大于1.0,部分区域甚至高达2.0以上,反映出其结构疏松、颗粒间连接微弱的本质。在这种高孔隙状态下,软土对外部荷载极为敏感,极易发生压缩变形。其压缩系数 a_{1-2} 通常大于 0.5MPa^{-1} ,属于典型的高压缩性土体,这意味着即使施加较小的附加应力,也可能引发显著的沉降。与此同时,软土的抗剪强度极低,内摩擦角一般

小于 10° ,黏聚力也多在 20kPa 以下,导致其承载能力严重不足。加之软土颗粒细小、排列致密,渗透系数普遍处于 10^{-7} 至 10^{-9}cm/s 量级,使得孔隙水排出极为缓慢,固结过程漫长。更为复杂的是,软土还表现出明显的流变特性,即在长期恒定荷载作用下,即使主固结已完成,仍会持续发生蠕变变形。这种时效性沉降对水利工程的长期稳定性构成了潜在威胁,尤其在水位频繁变动或结构荷载长期作用的工况下,可能引发不可逆的结构损伤。

1.2 对水利工程施工的主要影响

上述工程特性直接导致软土地基在水利工程施工中面临多重风险。最为突出的问题是不均匀沉降。由于软土层在空间上厚度变化大、物理力学参数离散性强,上部水工结构荷载施加后,不同区域的压缩量差异显著,极易造成结构开裂、接缝错位乃至渗漏失效。例如,在水闸或泵站基础中,若沉降差超出允许值,将直接影响闸门启闭功能与设备运行精度。此外,软土地基本身承载力远低于水工建筑物的设计要求,若未经处理直接施工,可能导致基础失稳甚至整体倾覆。在堤防、渠道等边坡类工程中,软土低抗剪强度的特性使其在自重、水压力或地震作用下极易发生滑动破坏,历史上不乏因软基失稳导致堤防溃决的案例。施工期间的沉降控制同样困难,若未提前采取预压或加固措施,施工过程中即可能发生可观测的沉降,干扰施工进度并增加后期修复成本^[1]。更值得警惕的是,软土的次固结沉降可持续数年甚至数十年,这种长期变形虽速率缓慢,但累积效应不容忽视,对水利工程全生命周期的安全运行构成持续挑战。因此,必须在设计与施工阶段采取系统性措施,从根本上改善软土地基的工程性能。

2 常用软土地基处理技术及其应用

2.1 换填法

换填法是一种历史悠久且直观有效的浅层软基处理手段,其核心思想是通过人工置换的方式,将表层承载力不足的软弱土体清除,并回填以砂、碎石、灰土或素土等具有良好工程性能的材料,再经分层压实形成稳定的人工地基。该方法适用于软土层厚度较薄(通常不超过3米)且地下水位较低的情况,常见于小型泵站基础、渠道衬砌或临时施工道路等工程。尽管换填法施工简便、工期短、效果立竿见影,但其局限性也十分明显:一方面,仅能处理浅层软土,对深层软弱夹层无能为力;另一方面,大量弃土的外运与处置不仅增加工程成本,还可能带来环境压力。因此,该方法在现代大型水利工程中的应用已逐渐减少,更多作为辅助或局部处理手段。

2.2 预压排水固结法

预压排水固结法是处理深厚软土地基的经典方法,其理论基础源于太沙基固结理论。该方法通过在地表施加预压荷载,促使软土孔隙水排出,从而实现土体压缩、强度增长与沉降提前完成的目标。为加速这一过程,工程中常配合设置竖向排水通道,如塑料排水板或砂井,以缩短排水路径、提高固结效率。根据加载方式的不同,可分为堆载预压、真空预压及两者联合的形式。堆载预压利用土石方或其他重物作为荷载,适用于材料充足、场地开阔的项目;而真空预压则通过铺设密封膜并抽真空形成负压场,等效施加约80kPa的均布荷载,无需额外堆载,特别适合临水区域或城市密集区。尽管该方法处理效果可靠、适用范围广,但其最大缺点在于工期较长,通常需数月乃至数年才能完成有效固结,且施工期间需持续监测沉降与孔隙水压力,以确保安全与效果^[2]。尽管如此,因其技术成熟、经济性较好,仍在大型堤防、围堰及港口码头等水利工程中占据重要地位。

2.3 强夯法

强夯法利用重锤(通常10~40t)从高处(6~20m)自由下落产生的巨大冲击能,对地基土进行强力夯实,以达到密实土体、提高承载力的目的。传统强夯适用于碎石土、砂土及低饱和度粉土等地层,但对于高含水量的软黏土,单纯强夯易导致土体扰动加剧,反而形成“橡皮土”,效果适得其反。为此,工程实践中发展出“强夯置换”技术,即在夯击形成的坑洞中回填碎石、块石等粗粒材料,形成具有一定刚度和排水能力的墩体,与周围软土共同构成复合地基。这种方法在滨海地区堤防加固中已有成功应用。强夯法的优势在于设备简单、施工速度快、成本相对较低,但其强烈的振动与噪音对周边

环境影响较大,且对极软淤泥层适应性有限,需谨慎评估地质条件后再行采用。

2.4 深层搅拌桩法

深层搅拌桩法(又称水泥土搅拌桩)通过专用机械将水泥浆或干粉与原位软土强制搅拌,形成柱状水泥土加固体。桩体硬化后具有较高的强度和较低的渗透性,与桩间土共同承担上部荷载,构成复合地基。该方法最大优点在于施工过程无振动、无噪音,对周边建筑物干扰小,且可处理深度达20米以上的软土层^[3]。此外,连续搭接的搅拌桩还可兼作止水帷幕,广泛应用于水闸、泵站等需兼顾承载与防渗的工程中。然而,其效果受土体化学性质影响较大,当软土中有机质含量过高或pH值异常时,水泥水化反应受阻,固化效果显著下降。同时,施工质量高度依赖操作人员的技术水平与设备稳定性,需加强过程控制与质量检测。

2.5 高压旋喷桩法

高压旋喷桩法利用高压喷射流(通常为水、气、浆三重管)切割并搅拌原状土体,同时注入水泥浆液,形成直径较大的圆柱状高强度固结体。与搅拌桩相比,旋喷桩成桩直径更大(可达0.6~2.0米),单桩承载力更高,且能适应更复杂的地层条件,包括砂层、黏土层甚至含有孤石的地层。在水利工程中,旋喷桩常用于关键部位如船闸底板、溢洪道翼墙等的地基加固,也可作为深基坑支护结构或防渗屏障。尽管其加固效果显著,但施工工艺复杂、造价较高,且会产生一定量的废浆,需妥善处理以避免环境污染。因此,该方法多用于对安全性要求极高或空间受限的重要工程节点。

2.6 碎石桩法

碎石桩法主要通过振冲器或干振成孔设备在软土中成孔,随后填入碎石并分层振密,形成密实的柔性桩体。碎石桩本身模量较高,可有效分担上部荷载,同时其良好的透水性为软土提供了竖向排水通道,有助于加速固结。该方法在水库坝基、堤防加高工程中有所应用,尤其适用于处理稍厚的淤泥质土层。相较于刚性桩,碎石桩具有较好的变形协调能力,能减少差异沉降^[4]。然而,在极软的淤泥中施工时,易出现孔壁坍塌、桩体缩颈甚至断桩等问题,影响整体加固效果。因此,施工前需进行试桩验证,并严格控制填料质量与振密参数。

2.7 土工合成材料加固法

土工合成材料加固法并非独立的地基处理手段,而是一种重要的辅助与增强措施。通过在软基表面或路堤内部铺设土工格栅、土工布或土工网垫,可实现加筋、排水、隔离与反滤等多重功能。例如,土工格栅通过与填土

的摩擦咬合作用,提高堤防或临时道路的整体稳定性,抑制侧向变形;土工布则可作为水平排水层,促进软土表层水分排出,加速浅层固结。该方法具有材料轻质、耐腐蚀、施工便捷、环保效益好等优点,近年来在生态水利工程中备受青睐。尽管单独使用时加固效果有限,但若与预压、桩基等方法联合应用,可显著提升整体处理效能,实现“1+1>2”的协同效应。

3 工程案例分析

在某大型水闸工程中,场区分布有厚度达15米的淤泥质软土层,天然地基承载力仅为60kPa,远不能满足水闸结构对180kPa承载力的要求。经过多轮技术经济比选,最终确定采用“塑料排水板结合真空联合堆载预压”的综合处理方案。施工过程中,按1.2米间距布设深度18米的塑料排水板,并铺设0.8米厚砂垫层作为水平排水通道,其上覆盖密封膜并同步堆载2.5米高土方。经过为期6个月的预压,实测沉降量已达到理论预测值的90%以上,处理后地基承载力提升至200kPa,完全满足设计要求,且有效控制了后期沉降风险。另在某城市排涝泵站建设项目中,场地下伏8米厚古河道淤泥层,地下水位高,施工空间受限。考虑到环境保护与施工安全,工程采用了双轴水泥土搅拌桩形成格栅式加固区,桩长12米,水泥掺量控制在15%。处理后的复合地基不仅承载力达标,还形成了有效的隔水屏障,防止周边地下水渗入基坑,保障了深基坑开挖与主体结构施工的顺利进行。这两个案例充分说明,软土地基处理必须立足于详实的地质资料,结合工程功能、环境约束与经济可行性,进行个性化设计与多技术融合,方能取得理想效果。

4 软土地基处理技术的发展趋势与优化建议

当前,软土地基处理技术正朝着绿色低碳、智能精准、复合集成的方向演进。一方面,行业积极探索利用粉煤灰、矿渣等工业固废替代部分水泥,降低碳排放;另一方面,BIM技术、物联网传感器与无人机遥感等信息化手段被引入施工全过程,实现对沉降、孔压、位移等关

键参数的实时监测与动态调控。更重要的是,单一技术已难以应对日益复杂的工程需求,“搅拌桩+预压”、“碎石桩+土工格栅”等复合处理模式逐渐成为主流,通过优势互补提升整体效能。

为进一步提升软基处理水平,建议从以下几方面着手:首先,强化前期工程地质勘察,精准刻画软土空间分布与力学参数变异规律;其次,建立覆盖施工期至运营期的全周期监测体系,动态评估地基稳定性;再次,在方案比选中引入全生命周期成本分析理念,统筹考虑初期投资、维护费用与潜在风险;最后,加快完善水利行业专属的软基处理技术标准体系,推动设计、施工与验收的规范化、精细化。

5 结语

软土地基是水利工程施工中不可避免的重大技术挑战。本文通过对软土工程特性的深入剖析,系统阐述了多种主流处理技术的原理、适用条件与发展现状。研究表明,各类技术各有优劣,不存在普适性的最优解,唯有基于详实勘察、明确目标与综合比选,采取因地制宜、多技融合的策略,方能有效化解软基风险。展望未来,随着绿色化、智能化与集成化技术的深入发展,软土地基处理将更加高效、精准与可持续,为我国水利基础设施的安全建设与长效运行提供坚实支撑。

参考文献

- [1]王红东.水利工程施工中软土地基处理技术应用分析[J].地下水,2025,47(05):266-267+289.
- [2]李雨才.水利工程施工中软土地基处理技术的研究与应用[J].中国设备工程,2025,(S2):266-269.
- [3]方艳霞.基于水利施工中软土地基处理技术的分析[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第六届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集.浙江省围海建设集团股份有限公司,2025:213-215.
- [4]王浩,耿玉芝,李福.水利工程施工中软土地基处理技术研究[J].水上安全,2025,(09):185-187.