

Research on foundation treatment technology of power engineering under complex geological conditions

Yuping Liu Bei Liu Jinjun Zhu

China Power Construction Group Qinghai Electric Power Design Institute Co., Ltd. Xining, Qinghai, 810008, China

Abstract

As power engineering projects continue to advance, complex geological conditions, such as variable geological structures, high groundwater levels, and uneven soil quality, pose significant challenges to foundation stability. This paper systematically analyzes the applicability of key techniques, including replacement filling, preloading, dynamic compaction, pile foundation methods, and other foundation treatment methods, under various geological conditions. It also validates their effectiveness through engineering case studies. The research findings indicate that the targeted and integrated use of multiple foundation treatments can significantly enhance foundation stability. Additionally, it summarizes the technical challenges encountered during construction and proposes optimization strategies to provide a reference for similar projects, ensuring the long-term safe operation of power facilities.

Keywords

complex geological conditions; power engineering; foundation treatment; replacement method; preloading method; dynamic compaction method; pile foundation method

复杂地质条件下电力工程地基处理技术研究

刘宇平 刘备 朱金军

中国电建集团青海省电力设计院有限公司, 中国·青海 西宁 810008

摘 要

随着电力工程建设的不断推进,复杂地质条件(如地质结构多变、地下水位高、土质不均等)对地基稳定性构成严峻挑战。本文系统分析了换填法、预压法、强夯法、桩基法及其他地基处理方法等关键技术在不同地质条件下的适用性,结合工程案例验证其处理效果。研究表明,针对性地综合运用多种地基处理,可显著提升地基稳定性。同时,总结了施工中的技术难点,并提出优化方案,为类似工程提供参考依据,确保电力设施长期安全运行。

关键词

复杂地质条件; 电力工程; 地基处理; 换填法; 预压法; 强夯法; 桩基法

1 引言

电力工程作为国家基础设施的核心部分,其建设质量直接影响经济发展和民生保障。随着项目规模扩大和地质条件日益复杂,软弱土层、高地下水位及岩土变异等问题对地基承载力与沉降控制提出了严峻挑战。为此,高效的地基处理技术成为确保工程安全的关键。

近年来,深层土壤改良、桩基技术和复合地基处理等领域取得显著进展,为复杂地质条件下的电力工程建设提供了有效解决方案。这些技术通过提升地基稳定性与承载性能,有效应对了差异沉降和结构安全风险。本文系统分析各类地基处理技术的适用条件与实施效果,结合电力工程特性,提出优化方案,并为今后类似工程的实施提供技术支持

和理论依据。

2 复杂地质条件的特点与挑战

在电力工程建设中,地基的质量和稳定性对工程的长期运行起着至关重要的作用。复杂地质条件通常表现为地下水、松软土层、大厚度风化层等地质特征,这些因素使得地基的处理更加复杂且具有挑战性^[1]。具体而言,复杂地质条件的主要特点包括:

2.1 土层的非均匀性

在复杂地质条件下,土层往往呈现出不均匀的分布,土质的厚度、密实度、含水量等均有较大差异。这种不均匀性直接影响了土壤的力学性质,导致地基承载力的不稳定,增加了基础设施建设中的安全风险。例如,在某些地区,土层可能由黏土、砂土等不同性质的土壤层构成,这些层次之间的差异可能导致基础沉降不均匀,进而影响整个电力工程设施的稳定性^[2]。面对这些问题,通常需要根据土层特性进

【作者简介】刘宇平(1991-),男,中国青海西宁人,硕士,高级工程师,从事电力工程勘察与设计方面研究。

行精确的设计，并根据不同土层的性质选择不同的加固方法。与此同时，土层中的含水量、密实度等因素，也要求施工人员采取适当的技术手段，避免因土质松软或不均匀而导致基础设施的沉降或变形。因此，这要求工程设计与施工中灵活运用地基处理技术，保证工程建设的长期稳定。

2.2 地下水的影响

地下水的存在对地基的稳定性和施工进度产生重要影响。在地下水丰富的地区，土壤的抗剪强度、压缩性等力学性质会受到较大影响^[3]。例如，地下水的渗透性强，会使得土体的有效应力减小，从而降低土壤的承载能力，增加地基的沉降量。特别是在潮湿地区或地下水位波动较大的区域，地下水不仅会导致土层的软化，还可能引发水土流失、滑坡等次生灾害，进而影响电力工程的建设进度和质量。此外，地下水的波动还可能引发不均匀沉降，甚至可能引起土壤的冲刷现象。因此，如何在地下水条件下进行有效的地基处理，成为电力工程建设中的重要课题。为了应对这些挑战，常见的处理方法包括深基坑排水、降水工程、加固土层等措施，以提高土壤的稳定性并保障施工过程的顺利进行。

2.3 岩土层的变化性

在复杂地质条件下，岩土层性质随深度变化显著，常出现软硬土层交替或夹层现象，导致地基设计难度加大。随着施工深度增加，土层可能由松软逐渐过渡至坚硬岩层，不仅影响设备选型，还使承载力预测更加困难^[4]。例如软土层易引发沉降，而硬岩层则增加施工难度和成本。针对此类问题，需通过详细地质勘察明确岩土分布特性，并采取分层处理策略。如对软弱土层可采用注浆加固或复合地基技术以提

高承载力；对坚硬岩层可优化钻探工艺或采用预裂爆破降低施工难度。通过差异化加固措施，确保地基整体稳定性和承载性能，兼顾经济性与安全性。

3 常见电力工程地基处理技术分析

在复杂地质条件下，地基处理技术的选择需要根据具体的土壤性质、地下水状况以及设计要求进行合理配置。常见的地基处理方法包括换填法、预压法、强夯法、桩基法及其他地基处理方法，每种方法具有不同的适用条件与技术特点。

3.1 换填法

换填法是电力工程常用的一种地基处理技术，通过挖除不良土层并回填优质材料（如砂砾石）来提高地基承载力。该方法适用于软弱土层较厚、地下水位较低的区域，能有效提升地基稳定性和承载力，尤其适合土质松软、强度低或含水量高的区域。施工核心在于精确控制挖掘深度、严格保证回填材料质量并确保充分压实，以防止沉降或不均匀承载。然而，该方法存在显著环境影响（尤其大规模开挖时），需合理设计排水系统应对地下水，且施工后需长期监测，同时需要较大施工空间和较高造价。某超高压输电线路工程中，部分位于深厚软弱粉质粘土区的塔基（见图1）即采用了换填法：挖除约1.5米深软弱土后，分层回填级配砂砾石混合料作为持力层，严格控制每层厚度（ $\leq 30\text{cm}$ ）并充分碾压至设计压实度；设置环形排水沟导排地表水及浅层地下水；长期监测表明地基沉降均匀可控，有效满足了超高压线路对基础承载力和变形的高要求。整体而言，换填法虽然具有较为显著的效果，但需要较大的施工空间和较高的工程造价。

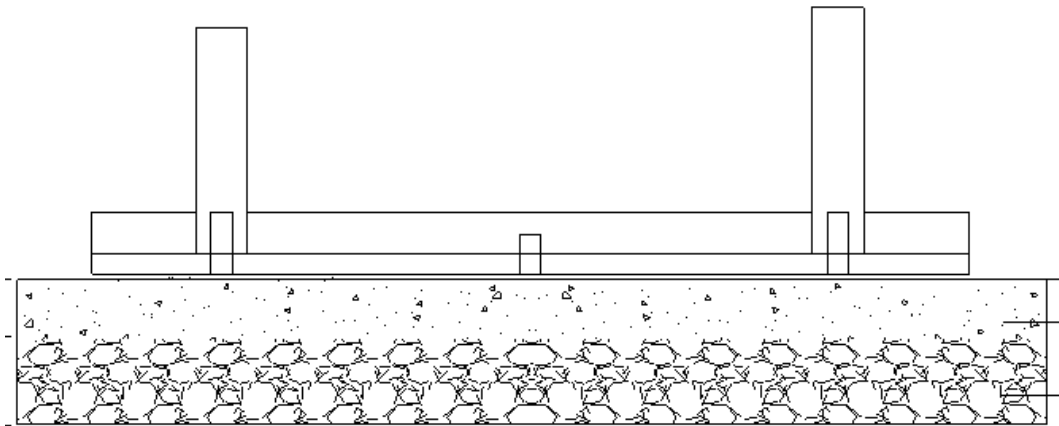
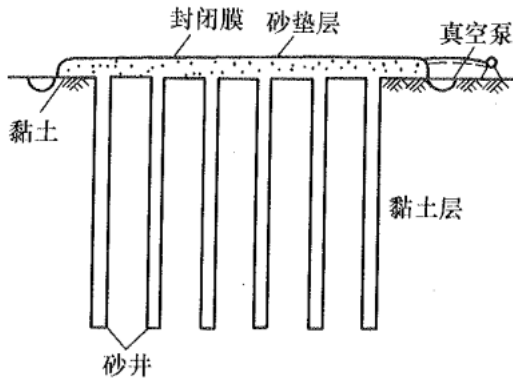


图1 基底换填示意图

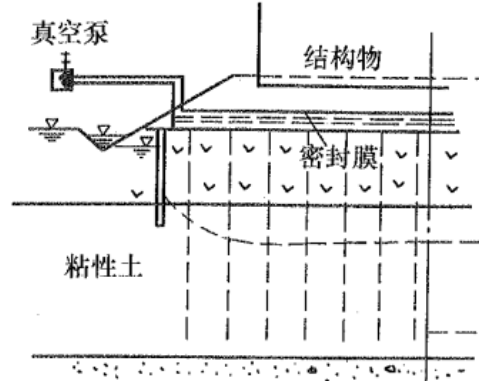
3.2 预压法

预压法适用于处理淤泥、淤泥质土、冲填土等饱和和软弱地基。预压法按处理工艺可分为堆载预压、真空预压和真空-堆载联合预压（见图2）。堆载预压法通过分级堆填土石材料，利用荷载自重促使软土固结，具有成本低廉但工期较长的特点，常配合塑料排水板或砂井使用；真空预压法则

通过抽真空形成负压实现地基加固，避免了堆载材料运输和边坡失稳问题，在换流站等工程中可将地基承载力显著提升；而真空-堆载联合预压法则综合两者优势，先利用真空预压完成大部分沉降，再辅以堆载补足荷载，既能缩短工期又可降低成本，已在特高压变电站等工程中取得良好效果。



(a) 真空预压示意图



(b) 真空 - 堆载联合预压

图 2. 预压法分类示意图

3.3 强夯法

强夯法是一种高效的地基处理方法，适用于碎石土、砂土、非饱和细粒土、湿陷性黄土及各类填土地基，主要通过重锤自由落体产生的冲击能实现土体密实^[5]。该方法分为普通强夯法和强夯置换法两类：前者通过反复夯击直接压实透水性较好的土层，如某 500kV 变电站工程采用 3000kN·m 夯击能使承载力从 150kPa 提升至 250kPa；后者则针对软黏土地基，通过夯入碎石形成置换墩体（如某风电项目置换墩使承载力超 300kPa）。施工中需通过试夯优化夯击能、遍数等参数，并采用隔振措施控制振动影响，其效果可通过动力触探或载荷试验验证，在缺少试验资料或经验时可按表 1 进行预估有效加固深度。

3.4 桩基法

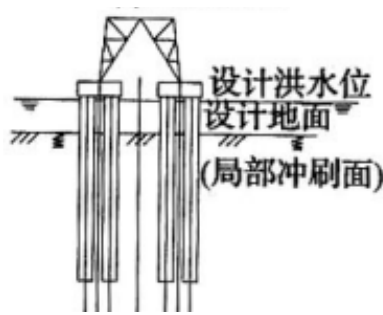
桩基法适用于电力工程软弱土层较深或地下水丰富的

地区。该方法通过将桩体插入地基，依靠桩侧与土层的摩擦力或桩端土层的端承力来提供承载力。桩基法具有承载力强、施工相对简便的优点，特别适合大型电力设施基础建设。桩基种类多样，包括摩擦桩、端承桩、复合桩等，其适用条件与施工要求各异，需根据具体地质条件和工程需求选择。该技术能有效解决软土、松散土等不良土层承载力不足的问题^[6]。

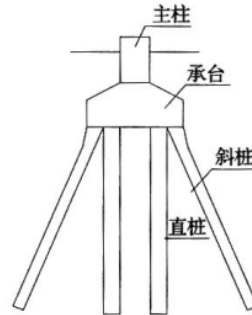
在电力工程中，桩基广泛应用于变电站、输电线路塔基、换流站及新能源发电场等关键设施的基础（见图 3）。然而，桩基施工需综合考虑桩型选择、布桩方式及桩土相互作用以确保稳定性。其难点在于精确控制桩的打入深度和最终承载力，防止沉降不均或桩体拔出。因此，工程设计与施工的精确性至关重要。

表 1 强夯的有效加固深度

单击夯击能 E (kN·m)	碎石土、砂土等粗颗粒土 (m)	粉土、粉质黏土、湿陷性黄土等细颗粒土 (m)
1000	4.0~5.0	3.0~4.0
2000	5.0~6.0	4.0~5.0
3000	6.0~7.0	5.0~6.0
4000	7.0~8.0	6.0~7.0
5000	8.0~8.5	7.0~7.5
6000	8.5~9.0	7.5~8.0
8000	9.0~9.5	8.0~8.5
10000	9.5~10.0	8.5~9.0
12000	10.0~11.0	9.0~10.0



(a) 灌注桩基础示



(b) 微型桩基础

图 3 桩基础形式示意图

3.5 其他方法

电力工程地基处理除常规方法外,亦采用多种特殊技术。微型钢管桩法(直径<300mm)凭借施工灵活、承载力高、邻近扰动小的优势,特别适用于空间受限区域(如变电站扩建区、设备基础间)的快速加固、托换及差异沉降精准控制。注浆加固法通过压力注浆填充岩土体裂隙与空洞(尤其适用于岩溶区或松散回填土),有效改善地基密实度、整体性和抗渗性,并能处理隐蔽缺陷或增强既有桩基。加筋土地基技术通过在土体中分层铺设土工合成材料形成加筋垫层,显著提高承载力、减少不均匀沉降并扩散应力,是站区道路、电缆沟等软弱土层上填方工程的优选方案^[7]。针对冻土区(如输电塔基)挑战,热棒(热虹吸管)技术利用工质相变循环主动导出地基热量以维持地温稳定,防止冻土融化下沉。对于深厚软土上对沉降敏感的建(构)筑物(如GIS室、主控楼),轻质材料填筑法(如EPS块体)通过超轻材料替代部分填土,大幅减载,有效控制沉降与侧向压力,尤其利于邻近设施保护。

4 复杂地质条件下的地基处理优化方案

4.1 综合使用多种处理方法

在复杂地质条件下,复杂地质条件下,单一方法难奏效,需综合运用多种地基处理技术以提高稳定性。例如,在某特高压换流站工程中先采用深层搅拌法加固软弱土层,再结合桩基法提升承载力。综合地基处理方法能最大限度增强地基安全性与稳定性,尤其适用于土层变化大或地下水丰富的区域。通过技术组合,可实现地基全面加固,保障长期承载稳定,并能更均衡、可靠地应对不同土层特性。

4.2 优化设计与施工工艺

优化设计与施工工艺是确保电力工程地基处理效果的关键。首先,依据详实的地质勘察数据(包括土层力学性质与地下水状况),制定科学合理的地基处理方案。技术路线和施工方法需精准匹配具体地质条件。其次,施工中需严格控制,确保各环节符合设计要求,防止因施工不当导致地基失稳;同时考虑气候、温度、湿度等环境因素,保证施工参数维持在适宜范围内。此外,施工人员的技术培训及高水平的施工管理是保障地基处理质量的重要环节。通过合理的施工工艺与高质量的施工管理,才能确保地基处理效果的长期稳定性。

4.3 智能化监控与数据分析

随着信息技术发展,智能化监控系统在电力工程地基处理中应用日益广泛。系统通过实时监测温度、湿度、应力等关键参数,能及时发现问题并调整,有效避免因施工细小偏差引发的地基不稳定^[8]。借助数据采集与监控系统,可实现对施工全过程跟踪,确保各环节符合预期要求。利用大数据分析技术对地基处理过程(结合历史与实时数据)进行全面评估,能进一步提高处理措施的准确性与可靠性,并预判潜在风险、提前干预。这种智能化的监控与数据分析手段,

在提升施工精度、降低工程风险方面具有重要意义。

5 地基处理技术的挑战与未来发展

5.1 技术挑战

尽管现有的地基处理技术已取得显著进展,但在复杂地质条件下仍然面临许多技术挑战。首先,如何应对大厚度软土层、复杂地下水条件以及强风化层等特殊地质条件,是地基处理技术需要突破的关键问题。针对不同的土层和地下水状况,如何选用合适的处理方法以及如何精准调整处理方案,仍然是地基处理中的难点^[9]。其次,现有技术的适用性和施工周期还存在一定限制,特别是在一些极端的地质条件下,传统的地基处理方法可能无法满足工程要求。此外,许多现有技术的施工周期较长,可能会导致项目整体进度的延误。因此,需要进一步优化现有技术,提高其适应性和施工效率,以应对更复杂的工程需求。

5.2 未来发展方向

随着工程技术的不断进步,未来的地基处理技术将朝着更加高效、环保、智能化的方向发展。例如,采用绿色环保的固化材料进行地基加固,减少对环境影响;通过高精度的地质勘探与监测设备,实时掌握地基的变化情况,精确调节处理方案,提高地基处理效果。

6 结语

在复杂地质条件下进行电力工程的地基处理,是确保工程稳定运行的关键环节。通过对换填法、深层搅拌法和桩基法等技术的研究与实践应用,本文提出了一些有效的处理技术和优化方案。未来,随着工程技术的发展,地基处理技术将不断创新,进一步提高地基处理的效率和安全性,为电力工程的顺利实施提供有力保障。

参考文献

- [1] 电力工程地基处理技术规程:DL/T 5024-2020[S],2020.
- [2] 吴春利,电力工程设计手册.北京市,中国电力工程顾问集团有限公司,2017-12-01.
- [3] 刘志伟,王纪元,樊柱军.电力工程砂石垫层法地基处理技术的标准编制及工程应用[J].电力勘测设计,2024,(11):1-6.
- [4] 赵李源,高湛,吴必华,等.某换流站地基处理方案研究[J].科技创新与应用,2022,12(35):68-72.
- [5] 张咪,常伟,张玉明.陕北±800kV换流站高填方湿陷性黄土地基处理方案研究[J].电力勘测设计,2021,(11):11-17.
- [6] 张建峰,薛韬,管维亚,等.沿海深厚软土地区变电站地基处理选型方法[J].电力勘测设计,2020,(09):47-53.
- [7] 李岩磊,孙晓红,师秀钦.湿陷性黄土地基处理方案优选[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(S1):205-208.
- [8] 鲁先龙.输电线路杂填土地基杆塔基础工程技术[J].电力建设,2012,33(11):19-22.
- [9] 高文龙,方锐,湛川,等.架空线路采空区地基处理方案的研究[J].武汉大学学报(工学版),2007,(S1):316-319.