水利施工中软土地基施工技术探讨

吴阿龙　徐葆清　张　伟
如东县水利电力建筑工程有限责任公司　江苏　南通　226400

摘　要：软土地基因其复杂的物质组成、特殊的结构特征及不良的物理力学性质，对水利工程的施工质量和安全构成了严峻挑战。本文深入剖析了软土地基的特性，详细探讨了传统与新型的软土地基施工技术，为水利施工中的软土地基处理提供科学、合理的解决方案。

关键词：水利施工；软土地基；施工技术；地基处理

引言：软土地基处理是水利工程施工中的关键环节之一。软土具有含水量高、透水性差、压缩性高、强度低等特点，这些特性导致软土地基在承受荷载时易发生沉降、失稳等问题，严重影响工程的稳定性和安全性。研究软土地基施工技术，对于确保水利工程的顺利进行和长期安全运行具有重要意义。

1 软土地基特性剖析

1.1 软土的物质组成与结构特征

(1)黏土矿物成分深入分析：软土，作为一种具有特殊工程性质的土壤，物质组成相当复杂。它主要由黏土矿物、有机质、粉土以及细砂等微粒共同构成。其中，黏土矿物是构成软土的核心成分，具有举足轻重的地位。具体而言，黏土矿物包括了高岭石、伊利石、蒙脱石等多种类型。这些黏土矿物因具备独特的层状结构，而拥有了较高的吸附性和离子交换能力。这种特性使得软土内部常常蕴含着大量的结合水和自由水，这些水分的存在对软土的物理力学性质产生了深远的影响，使其表现出明显的特殊性。(2)微观孔隙结构特性探讨：进一步观察软土的微观结构，我们会发现其孔隙结构异常复杂。孔隙比通常远超1，意味着孔隙体积占据了土壤总体积的较大比例[1]。这些孔隙之间的连通性却相对较差，这直接导致了软土的透水性极低，水分难以在土壤中自由流动。更为有趣的是，这些孔隙中常常填充着微生物、腐殖质以及可燃气体等多种物质。这些物质的存在不仅进一步加剧了软土的压缩性，使其在外力作用下更易发生形变，而且还使得软土的工程性质变得更加难以捉摸。特别是在长期荷载的作用下，软土的变形现象将愈发显著，对工程建设构成了不小的挑战。

1.2 物理力学性质详解

(1)高含水量对地基承载能力的影响机制：软土的高含水量是导致其地基承载能力低下的主要原因之一。通常，软土中的含水量可达10%至50%，甚至更高。高含水量使得软土的颗粒间结合力减弱，孔隙压力增大，进而影响了地基的强度和稳定性。在荷载作用下，软土易发生塑性变形，甚至导致地基失稳。(2)低渗透性与排水固结的关系探讨：软土的渗透系数极低，使得其排水固结过程缓慢。在荷载作用下，软土中的孔隙水不易排出，导致孔隙体积减小缓慢，地基固结变形时间长。软土地基的处理往往需要采取排水固结措施，如设置排水板、砂井等，以加速孔隙水的排出，提高地基的固结速度和承载能力。(3)软土的触变性及其在施工扰动下的变化规律：软土具有显著的触变性，即当原状土未受破坏时，具有一定的结构强度；但一经扰动，结构破坏，强度迅速降低或很快变成稀释状态。这一性质使得软土地基在施工过程中易受施工扰动的影响，导致地基强度和稳定性下降。在软土地基的施工中，需要严格控制施工速度和加荷速度，避免对地基造成过大的扰动。(4)强度特性与抗剪强度参数测定方法：软土的强度特性复杂，抗剪强度低，且与加荷速度和排水固结条件密切相关。为了准确测定软土的抗剪强度参数，通常需要进行室内剪切试验和现场剪切试验。室内剪切试验包括直接剪切试验、三轴压缩试验和无侧限抗压强度试验等，可以模拟不同的排水条件和加荷速度，得到较为准确的抗剪强度参数。现场剪切试验则主要采用十字板剪切试验等方法，可以反映软土地基在实际工程中的抗剪强度特性。

2 传统软土地基处理技术

2.1 置换法

(1)换填材料的种类、性能与选择依据：置换法是通过挖除表层软土，用物理力学性能较好的材料（如砂、碎石、灰土等）进行分层回填压实，以提高地基承载力、减少沉降量的一种方法。换填材料的种类多样，各有其独特的性能和适用条件。例如，砂和碎石因其良好的透水性，常用于排水不良地区的软土地基处理；灰土则因其较高的压缩模量和抗剪强度，适用于承载力要

求较高的工程。在选择换填材料时，需综合考虑地基条件、工程要求、材料来源和经济性等因素。(2)换填施工工艺流程详细步骤：换填施工工艺流程主要包括挖除软土、分层铺填、压实和检验四个环节。首先，需根据设计图纸和现场实际情况，确定换填范围和深度，用挖掘机或人工挖除表层软土。然后，按照设计要求，分层铺填换填材料，每层厚度一般不超过30cm，并严格控制材料的含水量。接着，用压路机或夯实设备对每层进行压实，直至达到设计要求的压实度。最后，进行质量检验，包括压实度检测、承载力试验等，确保换填质量满足要求。(3)质量控制要点与常见问题及解决措施：换填施工的质量控制要点主要包括压实度检测、换填边界处理和材料质量控制。压实度检测是确保换填质量的关键，需采用合适的检测方法（如灌砂法、核子密度仪法等）进行实时监测[2]。换填边界处理需确保换填材料与原土之间紧密结合，避免形成软弱带。材料质量控制则需从源头抓起，确保换填材料的质量符合设计要求。在换填施工中，常见问题包括换填深度不足、压实度不达标、换填材料含水量过高等。针对这些问题，可采取增加换填深度、加强压实措施、调整材料含水量等措施进行解决。

2.2 排水固结法

(1)排水系统设置原理与技术细节阐述：排水固结法是通过科学合理地设置排水系统（如砂井、塑料排水板等竖向排水体），并在地基上施加适当的预压荷载，以促使地基中的孔隙水有效排出，加速土体固结过程，从而显著提升地基承载力并有效减少沉降量的一种方法。排水系统的设置原理主要依赖于竖向排水体优越的导水性能，以此来加速地基内部孔隙水的排出过程。其中，砂井和塑料排水板作为最为常用的竖向排水体，其设计和施工环节均需依据地基的具体条件、预期的预压荷载以及排水要求等多方面因素进行全面细致的综合考虑。(2)预压荷载施加方式与控制要点：预压荷载的施加方式包括堆载预压和真空预压两种。堆载预压是在地基上堆放重物，使地基产生预压变形，加速孔隙水的排出。真空预压则是利用真空泵产生负压，使地基中的孔隙水被抽出。在预压荷载施加过程中，需严格控制加载速率和加载量，避免对地基造成过大的扰动和破坏。(3)固结过程监测与分析方法：固结过程的监测与分析是排水固结法施工中的关键环节。常用的监测方法包括孔隙水压力消散监测、沉降速率监测等。通过实时监测和分析这些数据，可以了解地基的固结情况，及时调整施工参数和方案。

2.3 强夯法

(1)强夯加固软土地基的力学原理：强夯法是通过起重设备将夯锤提升至一定高度后释放，利用夯锤自由下落产生的冲击能，对地基进行夯实加固的一种方法。其力学原理基于动力固结理论，即利用冲击能产生的冲击波和应力波，使地基中的土体颗粒重新排列、压密，从而提高地基承载力、减少沉降量。(2)强夯参数确定方法：强夯参数的确定需综合考虑地基条件、工程要求、施工设备和经济性等因素。常用的强夯参数包括夯击能、夯击次数、夯点间距、夯击遍数等。这些参数的确定需通过现场试验和理论分析相结合的方法进行。(3)强夯施工设备与工艺要求：强夯施工设备主要包括起重机、夯锤和脱钩装置等。起重机需具备足够的起重能力和稳定性；夯锤需根据设计要求和现场实际情况进行设计和制造；脱钩装置需确保夯锤能够准确、稳定地释放[3]。在强夯施工过程中，需严格控制施工顺序、夯击能和夯击次数等参数，确保施工质量。(4)强夯效果检测手段与质量评定标准：强夯效果的检测手段包括标准贯入试验、静载荷试验等。通过这些试验可以了解地基的承载力和变形特性等指标。质量评定标准则需根据设计要求和相关规范进行制定和执行。

3 新型软土地基处理技术

3.1 深层搅拌法

(1)水泥土深层搅拌桩的成桩机理：深层搅拌法是一种通过特制的深层搅拌机械，将水泥或石灰等固化剂与软土进行就地强制搅拌，使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的水泥土桩的方法。其成桩机理主要在于水泥与软土之间的化学反应过程及固化效果。水泥水化时产生的氢氧化钙与软土中的活性硅铝酸反应，生成不溶于水的硅酸钙凝胶，这些凝胶逐渐凝结硬化，将软土颗粒胶结成一个整体，从而提高地基的强度和稳定性。(2)施工机械与设备的特点：深层搅拌桩机根据搅拌轴的数量可分为单轴、双轴和三轴搅拌桩机三种类型。其中，单轴搅拌桩机适用于处理深度较浅的软土地基，其搅拌效果相对较弱；双轴搅拌桩机则凭借较强的搅拌能力和较好的成桩质量，适用于处理中等深度的软土地基；而三轴搅拌桩机则以其更强的搅拌能力和更大的处理范围脱颖而出，成为处理深厚软土地基的理想选择。(3)施工工艺参数控制与质量保证措施：深层搅拌桩的施工工艺参数包括搅拌速度、提升速度、水泥掺量等，这些参数的合理控制对于成桩质量至关重要。搅拌速度过快或过慢都会影响搅拌效果和成桩质量，提升速度过快则可能导致桩身强度不均，水泥掺量不足则会影响桩体

的强度和稳定性。在施工过程中需严格控制这些参数，并采取质量保证措施，如进行现场试验、实时监测成桩质量等。

3.2 高压喷射注浆法

(1)高压喷射注浆技术原理与分类：高压喷射注浆法是通过高压射流将浆液注入软土地基中，使浆液与软土颗粒发生置换、挤密和渗透作用，从而加固地基的一种方法。根据工艺流程和技术特点，高压喷射注浆法可分为单管法、双管法和三管法。单管法主要用于处理较小的孔隙和裂缝；双管法则是在单管法的基础上增加了压缩空气，使浆液能够更好地扩散和渗透；三管法则是在双管法的基础上又增加了高压水，使浆液能够更深入地注入地基中。(2)浆液材料性能与配方设计：浆液材料的性能对于高压喷射注浆法的加固效果至关重要。常用的浆液材料包括水泥浆液和化学浆液[4]。水泥浆液具有强度高、耐久性好等优点，但流动性较差；化学浆液则具有流动性好、渗透性强等优点，但成本较高。在实际工程中需根据地基条件、加固要求和成本等因素进行浆液材料的配方设计。(3)喷射注浆施工过程中的关键技术问题：在高压喷射注浆施工过程中，需严格控制喷射压力、旋转提升速度等关键技术参数。喷射压力过大可能导致地基破坏，喷射压力过小则可能影响加固效果；旋转提升速度过快则可能导致浆液分布不均，旋转提升速度过慢则可能影响施工效率。还需注意冒浆处理等问题，确保施工质量。

3.3 土工合成材料加筋法

(1)土工格栅、土工织物等加筋材料的性能与作用：土工格栅和土工织物等加筋材料，以其高强度、高模量和耐腐蚀的特性，成为提升地基性能的关键。它们通过铺设在软土地基中，利用筋土界面的摩擦力及应力扩散原理，有效地限制地基土体的变形和位移，从而提高地基的承载力和稳定性。(2)加筋土结构设计方法：设计加筋土结构时，必须全面考虑地基条件、荷载要求、加筋材料的性能等因素。通过精确计算筋材的间距、长度和层数，确保加筋土结构能够满足工程的承载力和稳定性要求。合理的结构设计是实现加筋效果的基础。(3)加筋土施工工艺与质量控制要点：加筋土的施工工艺包括筋材的铺设、填土的压实顺序与要求等关键环节。在施工过程中，必须严格控制筋材的铺设位置和间距，确保填土压实均匀、密实，以提高整体结构的稳定性。还需注重施工过程中的质量控制，进行现场试验、实时监测施工质量等，确保每一步都符合标准，从而保障加筋土结构的最终效果。

结束语：软土地基处理技术的选择与应用需综合考虑地基条件、工程要求、经济性等多方面因素。传统与新型软土地基处理技术各有优劣，应根据实际情况灵活选用。在施工过程中，应严格控制施工质量和参数，确保软土地基处理效果满足工程要求。未来，随着科技的不断进步和工程实践的不断积累，软土地基处理技术将更加成熟和完善，为水利工程的安全、高效建设提供有力保障。

参考文献

[1]张海宁.水利施工中的软土地基处理技术研究[J].智能城市,2021,7(11):137-138.

[2]李珊珊.水利工程软土地基处理施工质量管理[J].价值工程,2022,41(01):34-36.

[3]赵军亮.软土地基处理技术在水利施工中的应用[J].智能城市,2020,6(24):156-157.

[4]马佳佳.水利工程施工中的软土地基处理技术[J].农村经济与科技,2020,31(24):32-33.