

浅析高铁施工中软土地基的施工工艺

王银平

中国铁路兰州局集团有限公司兰州工程建设指挥部 甘肃 兰州 730000

摘要：本文聚焦高铁施工中软土地基的施工工艺，深入剖析软土地基特性及处理必要性，详细阐述真空联合堆载预压法、水泥土搅拌法、高压喷射注浆法、CFG桩法、冻结施工工艺等多种主流施工工艺的原理、适用条件、施工流程、优势与局限性，并结合实际案例分析施工工艺选择与效果评估。展望未来施工工艺发展趋势，旨在为高铁软土地基施工提供全面、科学的理论支持与实践指导，推动高铁建设技术不断进步。

关键词：高铁施工；软土地基；施工工艺；质量控制

1 引言

高铁作为现代交通运输体系的关键组成部分，以其高速、高效、安全、舒适等显著优势，成为推动区域经济发展、促进人员交流与资源整合的重要力量。随着高铁建设规模的不断扩大和建设标准的日益提高，施工过程中的技术难题也愈发凸显，其中软土地基的处理尤为关键。软土地基因其强度低、压缩性高、透水性差等特性，在高铁建设中若处理不当，极易引发地基沉降、不均匀沉降、路堤失稳等问题，严重影响高铁线路的平顺性、安全性和使用寿命。因此，深入研究高铁施工中软土地基的施工工艺，对于确保高铁工程质量、保障运营安全、推动高铁建设技术发展具有至关重要的意义。

2 软土地基特性及处理必要性

2.1 软土地基特性

软土地基主要是指强度低、压缩性高的软弱土层，通常由长期处于水下沉积形成的饱和性粘土构成，广泛分布于我国沿海、内陆平原以及山间盆地等地区。其物理力学特性对高铁建设具有重要影响：一是强度低：软土的抗剪强度较低，难以承受较大的荷载，在高铁列车荷载作用下易发生剪切破坏，导致地基失稳。二是压缩性高：软土具有较高的压缩性，在荷载作用下会产生较大的沉降变形，且沉降过程持续时间长，难以在短期内稳定。三是透水性差：软土的孔隙比大，但孔隙细小，透水性极差，排水固结缓慢，使得地基沉降过程漫长，增加了施工难度和工期。四是触变性和流变性：软土具有触变性，在受到扰动后强度会急剧降低；同时，它还具有流变性，在长期荷载作用下会产生持续的变形，进一步影响地基的稳定性。

2.2 处理必要性

在高铁施工中，软土地基若不进行妥善处理，将带来诸多严重问题：（1）地基沉降：由于软土的高压缩

性，高铁线路在运营过程中会出现持续的地基沉降，导致轨道不平顺，影响列车行驶的平稳性和安全性。（2）不均匀沉降：软土地基在不同部位的物理力学性质存在差异，加上施工荷载和列车荷载的不均匀分布，容易引发不均匀沉降，使轨道产生扭曲变形，增加列车脱轨的风险^[1]。（3）路堤失稳：软土地基的承载能力有限，当路堤填筑高度较大时，地基可能无法承受路堤的自重和列车荷载，导致路堤失稳滑坡，危及高铁线路的安全。因此，为确保高铁工程的顺利进行和长期稳定运营，必须根据软土地基的具体特性，选择合适的施工工艺进行处理，提高地基的强度、稳定性和承载能力，减小沉降和不均匀沉降。

3 主流施工工艺介绍

3.1 真空联合堆载预压法

真空联合堆载预压法是在堆载预压法基础上结合真空预压法原理，通过在软土地基表面铺设密封膜，利用抽气设备形成负压并施加堆载荷载，使地基土在两者共同作用下固结沉降，从而提高强度和承载能力。该方法适用于处理深厚软土地基，尤其对沉降要求严格、工期较紧的工程，当软土地基渗透性差，单纯堆载预压法固结时间长时，它能显著缩短固结时间、提高效率。施工时，先进行场地平整与排水系统铺设（铺设竖向塑料排水板和水平砂垫层），接着施工密封系统（在砂垫层上铺两层无纺土工布夹两层聚氯乙烯密封膜，确保紧密贴合、无破损褶皱，边缘用粘土或水泥砂浆密封），再安装抽气系统（在密封膜上安装 $\phi 90\text{mm}$ PVC主管和间距约6米、 $\phi 75\text{mm}$ PVC支管，支管钻小孔并外包透水土工布，连接抽气设备并调试），之后启动抽气设备使真空度达80kPa以上，同时分层堆填土石料形成堆载荷载（控制堆载速度和高度），预压期间监测地基沉降、侧向位移等参数，当地基平均固结度达85%以上且沉降速率等满足要

求时卸载。其优势在于能缩短固结时间、减少堆载土石料用量、降低成本、提高地基强度和承载能力、减小工后沉降和不均匀沉降；局限性是施工工艺复杂，对密封系统施工质量要求高，密封不严会影响效果，抽气设备持续运行能耗大，且需加强参数监测，增加施工管理难度。

3.2 水泥土搅拌法

水泥土搅拌法利用水泥（或水泥石灰拌合物）等作固化剂，借助特制深层搅拌机械，在地基深处将软土与固化剂强制搅拌，形成具有整体性、水稳性及一定强度的水泥土桩体，桩体与周围软土构成复合地基，以此提高地基强度和承载能力、减小沉降量，按施工方法分为浆喷法（喷水泥浆与软土成桩）和粉喷法（喷水泥粉与软土成桩）。该方法适用于处理正常固结的淤泥与淤泥质土、粉土等多种地基，当地基土天然含水量在30% - 70%之间时效果较好，对于有机质含量高、塑性指数大于25的黏土等特殊情况，需现场试验确定适用性。施工时，先平整场地、测量放样并标记桩位，再将搅拌机械就位并调整垂直度和水平度，接着预搅下沉，之后根据方法制备固化剂浆液或喷粉，提升喷浆（粉）搅拌，还可按设计要求重复搅拌，最后移位施工下一根桩^[2]。其优势在于工后沉降小、能有效提高承载能力、工期短、对周边环境影响小且调整固化剂掺入量和配合比灵活性大；局限性是搅拌桩质量难保证均匀一致，桩底端成桩质量差，对软土深度大的地基可能需结合其他方法，且桩体强度增长慢，未达设计要求前不宜承受大荷载。

3.3 高压喷射注浆法

高压喷射注浆法是利用钻机将带喷嘴的注浆管钻至土层预定位置，以高压设备使浆液或水形成20 - 40MPa高压射流冲击破坏土体，钻杆渐升使浆液与土粒强制搅拌混合，凝固后形成圆柱状固结体（旋喷桩），进而提高地基强度和承载能力、减小渗漏。该方法适用于处理淤泥、黏性土等多种地基，当地基土含较多大粒径块石等特殊情况时，需现场试验确定适用性，地下水流速过大等情况则不宜采用。施工时，先钻孔（直径一般比注浆管大20 - 50毫米，控制垂直度偏差不超过1%），再插管（边射水边插，水压力一般不超过1MPa），接着按设计喷射参数进行喷射注浆并密切观察调整参数，完成后冲洗设备，最后移动机具施工下一根桩。其优势在于设备简单、操作方便，可灵活调整喷射参数和桩体布置，能有效提高地基强度和抗渗性能、减小沉降；局限性是施工噪音大、影响周边环境，成本较高，深厚软土地基施工工期长，且旋喷桩质量受施工工艺和地质条件影响大，施工控制不当易出现桩体不连续等问题。

3.4 CFG桩法

CFG桩（水泥粉煤灰碎石桩）法是在碎石桩基础上加入水泥、粉煤灰、石屑加水拌合，用振动沉管打桩机等设备制成具有一定黏结强度的桩体，桩体与桩间土通过褥垫层形成复合地基共同承担上部荷载，其强度高于水泥土搅拌桩，能将更多荷载传至深层土层，提高地基承载能力、减小沉降量。该方法适用于处理黏性土、粉土、砂土和已自重固结的素填土等地基，淤泥质土需根据地区经验或现场试验确定适用性，处理深度不宜大于25米。施工时，先测量放样标记桩位，再将成桩设备就位并调整垂直度和水平度，接着沉管至设计标高并控制速度和垂直度，之后向钢管内投入按设计配合比拌合好的混合料，投料完成后边拔管边振动，保持钢管内混合料高度，完成一根桩后移位施工下一根，最后清除桩顶浮浆，铺设厚度150 - 300毫米的中砂、粗砂或碎石等褥垫层并分层夯实^[3]。其优势在于桩体强度高、承载能力大，能提高地基强度和稳定性，施工工艺简单、设备要求低、易于操作，可灵活调整混合料配合比，对周边环境影响小；局限性是施工噪音大，在软土地基施工易出现桩身缩颈、断桩等问题，且桩体强度增长需一定时间，未达设计要求前不宜承受大荷载。

3.5 冻结施工工艺

冻结施工工艺借助制冷设备与封闭式液压系统，将冷冻液注入软土或利用液态二氧化碳、液态氨等制冷剂，使软土中水分冻结形成有强度的冻土墙或冻土柱，提高软土强度、稳定性并降低压缩性，为高铁施工创造条件。它适用于含水量高、渗透性差的软土地基，尤其适合地下水位高、施工环境复杂且需快速提高地基强度和稳定性的工程，如高铁隧道施工、深基坑开挖等，可有效防止涌水、涌砂等事故。施工时，先按工程要求和地质条件确定间距、深度和排列方式钻设冻结孔并控制垂直度和偏差，再将无缝钢管冻结管插入并密封，接着连接氨或氟利昂制冷机组组成制冷循环系统，启动设备输送冷冻液并实时监测调整参数确保冻结效果，冻结达标后进行高铁施工并加强监测，施工完成后根据需要自然或强制解冻，采取排水、回填压实等措施防止地基沉降和不均匀沉降。其优势是能快速提高地基性能、防止事故、适应复杂地质和施工环境且对周边环境影响小；局限性是成本高、需专业设备和技术人员、工艺复杂、周期长，且解冻时可能出现地基沉降问题需处理。

4 施工工艺选择与案例分析

4.1 施工工艺选择依据

在选择高铁施工中软土地基的施工工艺时，需要综

合考虑多种因素：（1）地质条件：包括软土的类型、厚度、含水量、渗透性、压缩性等。不同的地质条件对施工工艺的适应性不同，例如，对于含水量较高、渗透性较差的软土地基，真空联合堆载预压法或冻结施工工艺可能更为合适；而对于软土深度较浅的情况，换填法可能是更经济的选择。（2）工程要求：如地基承载力、沉降控制标准、工期要求等。对于对沉降要求严格、工期较紧的工程，可能需要选择处理效率高、能快速提高地基强度的施工工艺，如高压喷射注浆法或预应力混凝土管桩法^[4]。（3）施工环境：包括周边建筑物、地下管线、交通状况等。施工环境会对施工工艺的选择和施工方案的制定产生重要影响，例如，在靠近居民区的施工现场，应尽量选择噪音小、振动小的施工工艺，如水泥土搅拌法。（4）经济成本：不同施工工艺的成本差异较大，包括材料成本、设备成本、人工成本等。在选择施工工艺时，需要在满足工程要求的前提下，综合考虑经济成本，选择性价比高的施工方案。

4.2 案例分析：银兰高铁中兰段CFG桩复合地基处理工程

4.2.1 项目背景

银兰高铁中兰段地处甘肃省、宁夏回族自治区两省境内，是我国“八纵八横”铁路网京兰通道的重要组成部分，设计时速250公里。中兰段某标段位于黄河河谷阶地、黄土梁峁区和李麻沙沟河谷阶地区，地质条件复杂，存在较多积的软弱土层（如粉质黏土、淤泥质土）和松散砂层，天然地基承载力不足，需进行地基加固处理以满足高铁轨道对沉降控制的严格要求（总沉降量 $\leq 15\text{mm}$ ，工后沉降 $\leq 5\text{mm}$ ）。

4.2.2 CFG桩设计方案

（1）桩型选择

采用长螺旋钻孔、管内泵压混合料灌注成桩工艺，桩径400mm，桩长8-15m（根据地质剖面动态调整），桩间距1.6m，按正方形布置。

（2）复合地基设计

桩体强度等级C20，配合比为水泥:粉煤灰:碎石:水=1:2:5:0.5（重量比）。褥垫层采用50cm厚碎石，铺设于桩顶与承台之间，以协调桩土应力比。设计复合地基承载力特征值 $\geq 250\text{kPa}$ ，单桩承载力特征值 $\geq 800\text{kN}$ 。

（3）沉降控制措施

通过加密桩间距（局部区域加密至1.4m）和设置过渡段，减少差异沉降。

4.2.3 施工过程关键技术

（1）场地准备

清除地表杂物，平整场地至 $\pm 10\text{cm}$ 精度。埋设护筒（直径比桩径大200mm）防止孔口塌陷，护筒顶高出地面30cm。

（2）成孔工艺

使用长螺旋钻机（型号CFG-30）钻孔至设计标高，钻进速度控制在1-2m/min，避免孔壁坍塌。终孔后清孔2分钟，确保孔底沉渣厚度 $\leq 50\text{mm}$ 。

（3）混合料灌注

采用混凝土搅拌站集中拌合，运输车泵送至桩顶，坍落度控制在160-200mm。灌注时保持钻杆芯管充满混合料，提钻速度与泵送量匹配（提钻速度 $\leq 2.5\text{m/min}$ ），防止断桩。

（4）质量检测

成桩后7天：低应变动力试桩检测桩身完整性（Ⅰ类桩 $\geq 95\%$ ，无Ⅲ、Ⅳ类桩）。成桩后28天：静载试验验证单桩承载力，抽检比例1%且 ≥ 3 根；复合地基平板载荷试验抽检比例0.5%且 ≥ 3 点。沉降监测：埋设沉降板，施工期间每周观测1次，运营前3年每季度观测1次。

结语

高铁施工中软土地基施工工艺是保障工程质量和运营安全的关键。本文介绍了多种主流工艺的原理、适用条件等，通过案例说明工艺选择的重要性，还阐述了施工质量控制、安全环保措施。未来施工工艺将创新完善，向智能化、绿色环保、新型地基处理技术方向发展。

参考文献

- [1]杨雷,白鹏俊,谭博,等.合新铁路五河站段软土地基治理技术研究[J].安徽建筑,2024,31(10):126-127+152.
- [2]王亮.高铁施工中软土地基的施工工艺探究[J].工程技术研究,2019,4(17):82-83.
- [3]富岩.高铁路基软土地基管桩试桩工艺研究[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2022,24(06):17-20.
- [4]戴世安.间歇排水条件下高铁软土地基变形研究[D].中国矿业大学,2021.