

# 公路软土地基换填处理施工要点与质量控制

葛 健

安徽中辰交通工程科技有限公司 安徽芜湖 241000

**摘 要：**软土地基具有强度低、压缩性高、透水性差等工程特性，是公路建设中常见的难题，极易引发路基沉降、路面开裂、边坡失稳等一系列工程病害。换填处理作为一种基础加固措施，因其施工简便、效果可靠，在软土地基处理中得到了广泛应用。本研究系统阐述了公路软土地基换填处理的原理、适用条件和设计类型，并深入探讨了施工过程中的关键技术要点，包括原状软基的开挖与支护、换填材料的精选与调配、以及换填层的分层压实与沉降控制。在此基础上，论文重点构建了以填料质量、含水率、压实度动态检测为核心的质量控制体系，并提出了完善的验收标准和长期监测机制。研究旨在为公路软土地基换填工程提供科学的施工指导和严格的质量保障，从而提高公路工程的整体稳定性和耐久性。

**关键词：**软土地基；换填处理；施工要点；质量控制；沉降控制；含水率；压实度

## 引言

随着我国公路交通基础设施建设的快速发展，道路工程不可避免地要穿越大面积的软土区域，如沿海滩涂、湖沼地带或冲积平原。软土地基通常由淤泥、泥炭土或高含水量的饱和黏性土组成，其天然含水率高、抗剪强度低、压缩性高且固结慢，导致在其上修建的路基面临着工后沉降量大、持续时间长、沉降不均匀等严峻的工程挑战。这些地基缺陷若未得到有效处理，将直接引发路基变形、路面结构破坏和边坡失稳，严重威胁公路的安全运营和使用寿命。在众多软土地基处理方法中，换填处理，尤其是深层换填，是一种应用历史悠久且效果显著的基础处理技术。其基本原理是移除承载力极差的浅层软土，替换为高强度、低压缩性的优质填料（如砂砾、碎石等），从而提高地基的承载力，同时减少路基荷载对深层软土的附加应力，从根本上控制工后沉降。然而，换填处理的最终效果对施工过程的质量控制要求极高，任何一个环节，如软基的开挖、换填材料的质量、以及换填层的压实度，出现偏差，都可能导致换填层的整体强度和均匀性受损。因此，系统研究公路软土地基换填处理的施工要点，建立严格的质量控制体系，对于确保工程质量、实现地基的长期稳定至关重要。

## 一、软土地基换填处理的原理与设计

### （一）软土地基的工程特性与处理必要性分析

软土地基是指由淤泥、淤泥质土、黏土等构成，具

有高含水率、高压缩性、低渗透性和低抗剪强度的地基土层。这些特性决定了软土地基在承受上部公路路基荷载时，会发生较大的固结沉降。软土的固结过程往往需要数年甚至数十年，导致路基长期处于沉降状态，引发路面结构疲劳，产生裂缝和车辙。此外，软土的低抗剪强度使其在路基边坡和路肩部位容易发生剪切破坏，造成边坡失稳和路基侧向挤出。因此，对软土地基进行工程处理是确保公路结构安全和使用性能的必要前提。处理的目标是提高地基的短期和长期承载力，同时将路基的工后沉降控制在设计允许的范围之内，确保地基的均匀性和稳定性。

### （二）换填处理的适用条件与设计原理

换填处理技术主要适用于软土层厚度相对较浅（通常在3米至8米范围内）、且软土层下卧持力层强度较高的地基。换填处理的设计原理是采用性能优良的填料，如级配良好的砂土、碎石或石灰土，替换掉一定厚度的软弱土层。通过这种替换，地基的整体承载力得以提高，路基的稳定性和刚度显著增强。换填深度是设计的核心参数，它不仅取决于软土层的厚度和强度，还要综合考虑路基高度和允许的残余沉降量。换填后的填料层作为新的持力层，其强度和压缩性指标必须达到设计要求，以有效控制路基的工后沉降和侧向变形。设计中还需要考虑换填边界对周围土体的应力集中影响，确保换填边界的稳定。

### （三）换填处理的类型划分与适用性分析

软土地基换填处理根据施工范围和深度可以划分为

不同的类型，主要包括全部换填、局部换填和垫层换填。全部换填是指将路基下方的全部软土层挖除，并替换为优质材料，适用于软土层较浅且强度极低的情况，但工程量较大。局部换填主要针对软土地基中的局部软弱带或地质缺陷区域进行处理，例如仅在路基边缘或涵洞台背等部位进行，以解决局部差异沉降和应力集中的问题。垫层换填则是在原状软土表面铺筑一定厚度的砂垫层或碎石垫层，垫层本身不具备完全替代软土的功能，而主要起到排水、加固和应力分散的作用，通常作为其他软基处理方法（如堆载预压、排水固结）的辅助措施。选择具体的换填类型时，必须结合地质勘察报告、水文条件、软土层厚度及经济成本进行综合评估，确保技术上的可行性和经济上的合理性。

## 二、软土地基换填施工的关键技术要点

### （一）原状软基的开挖、运输与临时支护

软土地基换填施工的首要关键环节是原状软基的开挖。由于软土强度极低、含水率高，且处于饱和或接近饱和状态，开挖过程中极易发生边坡失稳、流泥或底部隆起。因此，施工必须遵循分段、分层、限深的原则，严格控制开挖的速率和时序。开挖的深度和宽度必须符合设计图纸要求，严禁超挖或欠挖。在开挖过程中，应特别注意采用有效的临时支护措施，例如在深挖区域可设置钢板桩、土钉墙或临时放坡并及时回填，以防止边坡滑动和坍塌。挖出的软土应立即用不透水材料运输至指定的弃土场，严禁在现场附近堆放，以避免其自重对已开挖基坑造成二次挤压。开挖完成后，基底应迅速进行清理和平整，并及时进入下一工序，以减少软基暴露时间，防止雨水浸泡和扰动。

### （二）换填材料的选用、调配与铺筑工艺

换填材料的质量是决定换填效果的关键。优质的换填材料应具备高强度、低压缩性、良好的透水性和优良的压实性能。常用的换填材料包括级配良好的砂土、碎石、或符合要求的工业废渣。在材料选用前，必须进行严格的室内试验，确定其最大干密度、最佳含水率、级配以及承载力指标。在材料调配方面，如果使用混合填料，必须在拌合场进行充分均匀的拌合，保证填料的均匀性。在现场铺筑工艺上，应采用薄层、均匀、对称的原则。换填材料应从路基两侧向中心或从稳定区向软弱区对称铺筑，以平衡对基底软土的侧向挤压。每层的铺筑厚度必须严格控制在压实机械的有效压实厚度范围内，通常为30厘米至50厘米，并严格禁止在同一层内出现厚

度差异过大的现象。

### （三）换填层的分层压实与沉降控制

换填层的分层压实是实现换填处理加固效果的决定性步骤。压实必须采用重型振动压路机，遵循“先轻后重、先慢后快、边缘到中心”的原则进行。分层压实可以确保每层填料都能达到设计要求的密实度。在压实过程中，必须根据填料类型和含水率，通过试验段确定最佳的压实遍数、振动频率和振幅等参数，并全程监控实施。对于换填层的沉降控制，需要注意的是，在换填材料自身压实固结的同时，换填荷载也会对下卧的残余软土层产生附加应力，引发二次沉降。因此，制度上应要求在换填层填筑完成后，设置监测点对换填层的表面沉降、侧向位移和孔隙水压力进行实时监测，通过监测数据及时评估工后沉降的风险，并在必要时调整施工方案或采取额外的沉降控制措施。

## 三、换填处理的施工质量控制与验收

### （一）填料质量与含水率的精细化检测控制

换填处理的质量控制是一项系统而严格的工程，必须从源头和过程两个环节进行精细化、科学化管理。首先，填料的质量控制是基础，对于运入场地的每一批次换填材料，均需要进行严格的进场检验。检验内容不仅包括常规的颗粒级配、塑性指数等指标，还需对材料的力学性能，如最大干密度、承载力指标进行复检，确保所有指标均达到设计文件和相关规范的要求。应建立详细的材料追溯体系，记录填料的来源、运输批次和现场使用位置，以便出现问题时能够迅速定位。其次，含水率的精细化控制是保证压实质量的关键。由于含水率对压实效果具有决定性影响，施工中应淘汰传统的慢速检测手段，推广使用快速、高精度的含水率检测设备，如中子水分仪或电阻式传感器，对填料进行实时、多点的含水率检测。基于室内试验确定的最佳含水率和现场检测数据，利用计算机或智能终端精确计算每批填料所需的加水量或晾晒时间，指导现场的洒水车和拌合设备进行精准的含水率调控，确保填料在碾压时的含水率精确稳定在最佳含水率允许偏差（通常为 $\pm 2\%$ ）的范围内。

### （二）压实度与均匀性的现场动态检测

换填处理施工质量控制的核心在于确保换填层的压实度达标，并且具有高度的均匀性。传统的抽样检测方法，如灌砂法或核子密度仪法，由于检测点有限，难以全面反映大面积换填层的整体质量，容易造成漏检或误

判。因此，必须引入现场动态检测技术来实现对压实全过程的连续监控。应全面推行智能压实技术，通过在振动压路机上安装高精度全球定位系统（GPS）和振动响应传感器，实现对施工过程的“全覆盖”监控。GPS系统用于记录压路机的行驶轨迹、速度和碾压遍数，确保无漏压、欠压或超压区域，保证压实作业的均匀性。振动响应传感器则实时采集压实过程中土体的振动加速度信号，并利用算法计算出路基材料的压实度指标或刚度模量（如连续刚度值CCV），这些数据能够连续、高密度地反映填料层的密实度和刚度。系统会将碾压遍数和CCV值以彩色图谱形式实时显示给操作人员，实现可视化压实，指导操作人员对刚度不足的区域进行即时补压，从而将压实质量控制从被动的事后验收转变为主动、实时的过程控制。

### （三）质量验收标准与长期监测机制

换填处理工程的最终质量验收必须依据国家和行业规范的严格标准，并结合多源检测数据进行综合判定。验收内容应包括对换填深度和宽度、填料的质量指标、压实度以及地基承载力的全面检验。对于压实度的验收，应以现场随机抽检结果为主，结合智能压实动态检测图谱的整体评价，确保区域间的均匀性和整体达标率。除了常规的压实度检测，还应采用承载板试验或重型动力触探等方法对换填层的承载能力进行检验。更为关键的是，鉴于软土地基的工后沉降具有长期性和滞后性，制度上必须建立完善的长期监测机制。验收合格后，应在路基中心、路肩、软硬基交界处等关键敏感部位设置永久性沉降观测点、侧向位移观测点和孔隙水压力计。监测应持续到地基的沉降速率趋于稳定（达到设计规定的阈值）或达到设计规定的监测年限为止。长期监测数据的收集、分析与反馈，不仅能够及时预警潜在的沉降风险，为后期路面养护提供决策依据，而且为后续类似工程的设计和施工积累宝贵的经验数据，实现对公路地基

的全寿命周期质量管理。

### 结语

公路软土地基换填处理是保障道路结构稳定性和耐久性的重要基础工程。其施工质量直接决定了公路的长期服务水平和运营安全。本研究从软土地基的工程特性出发，系统阐述了换填处理的类型划分、施工要点以及质量控制体系。重点强调了在施工中必须严格控制原状软基的开挖与支护、确保换填材料的优质和均匀调配、以及实施分层压实和沉降的实时监测。在质量控制方面，引入精细化含水率管理和动态检测技术，是实现压实质量均匀、高效达标的关键。未来的研究应致力于开发更加智能化的换填施工设备，将填料的自动调配、含水率的实时监测与压路机的智能压实系统进行深度集成，构建全自动、高精度的软基换填施工系统，以适应我国高速公路建设对高标准、高耐久性工程的迫切需求。

### 参考文献

- [1] 刘佳, 张建明. 公路软土地基换填处理的施工控制要点及效果评价[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 112-120.
- [2] 赵宇. 软土地基处理中换填材料的选择与分层压实技术研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(4): 65-72.
- [3] 周军, 王强. 高速公路软土地基换填工程的动态质量控制与检测技术[J]. 中国公路学报, 2023, 36(6): 101-109.
- [4] 李明哲. 浅层软土换填处理的长期沉降特性与工后监测研究[D]. 东南大学硕士学位论文, 2021.
- [5] 陈海涛, 赵文. 软土地基换填施工中含水率对压实度的影响机制与控制[J]. 公路工程, 2024, 46(2): 50-55.