

高速公路桥梁施工中地基处理的技术要点分析

巍巍, 王浙健

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ETQM.2026010011

摘 要 : 高速公路桥梁地基作为桥梁结构的承载基础, 其稳定性直接决定桥梁的安全性能与使用寿命。本文以高速公路桥梁地基处理为研究对象, 结合不同地质条件(软土地基、岩质地基、填土地基)的工程特性, 分析地基处理需解决的核心问题, 如承载力不足、沉降变形、抗滑稳定等。在此基础上, 系统梳理换填垫层法、排水固结法、复合地基法、注浆加固法等常用处理技术的适用场景与操作要点, 重点探讨施工过程中的技术控制难点(如沉降监测、压实度控制、浆液配比), 并提出针对性优化建议, 旨在为高速公路桥梁地基处理提供技术参考, 确保地基满足桥梁结构的承载要求与长期稳定性需求。

关 键 词 : 高速公路桥梁; 地基处理; 软土地基; 复合地基; 沉降监测; 承载力

Analysis of Technical Key Points of Foundation Treatment in Expressway Bridge Construction

Wei Wei, Wang Zhejian

Zhejiang Jiaogong Hongtu Transportation Construction Co., LTD, Hangzhou, Zhejiang 311305

Abstract : As the load-bearing foundation of the bridge structure, the stability of the foundation of expressway Bridges directly determines the safety performance and service life of the Bridges. This paper takes the foundation treatment of expressway Bridges as the research object, and combines the engineering characteristics of different geological conditions (soft soil foundation, rock foundation, fill foundation) to analyze the core problems that need to be solved in foundation treatment, such as insufficient bearing capacity, settlement deformation, and anti-skid stability. Based on this, the applicable scenarios and operational key points of commonly used treatment techniques such as the replacement and filling cushion method, drainage consolidation method, composite foundation method, and grouting reinforcement method are systematically sorted out. The technical control difficulties during the construction process (such as settlement monitoring, compaction degree control, and slurry ratio) are mainly discussed, and targeted optimization suggestions are put forward, aiming to provide technical references for the foundation treatment of expressway Bridges. Ensure that the foundation meets the load-bearing requirements and long-term stability demands of the bridge structure.

Keywords : expressway bridge; foundation treatment; soft soil foundation; composite foundation; settlement monitoring; bearing capacity

前言

高速公路桥梁地基与普通公路地基相比, 具有承载荷载大、沉降控制严、耐久性要求高的特点——桥梁墩台需承受上部梁体、车辆荷载及环境荷载(如风力、温度变化), 地基需具备足够的承载力(通常要求 $\geq 250\text{kPa}$); 同时, 桥梁结构对沉降变形极为敏感, 工后沉降需控制在50mm以内, 不均匀沉降需 $\leq 2\%$, 避免因沉降差异导致结构内力集中。这就要求地基处理不仅要满足短期承载力需求, 更要保障长期稳定性, 减少后期沉降变形。基于此, 深入分析不同地质条件下地基处理的技术要点, 对提升高速公路桥梁工程质量、降低运维成本具有重要现实意义。

一、高速公路桥梁地基处理核心需求与地质特性

高速公路桥梁地基处理需围绕三大核心需求展开: 一是满足承载力要求, 桥梁墩台、桩基荷载需通过地基传递至深层土层,

需通过加固、换填等技术提升地基承载力, 通常要求地基承载力特征值 $\geq 200\text{kPa}$, 特大跨度桥梁需 $\geq 300\text{kPa}$, 避免地基剪切破坏引发墩台倾斜、沉降超标; 二是控制沉降变形, 地基沉降含瞬时、固结、次固结三类, 简支梁桥工后沉降需 $\leq 30\text{mm}$, 连续梁

桥、斜拉桥等大跨度桥梁需 $\leq 20\text{mm}$ ，不均匀沉降 $\leq 1\%$ ，需通过排水、加固加速沉降稳定，防止桥面开裂、支座变形；三是保障抗滑与抗渗稳定，山区岩质地基需解决顺层岩面、裂隙引发的抗滑问题，地下水丰富区域需设防渗层或封堵裂隙，避免地基土软化、管涌。^[1]

常见地质类型及工程特性差异显著：软土地基多见于沿海、河流冲积平原，由淤泥、泥炭土组成，天然含水量 $\geq 35\%$ 、孔隙比 ≥ 1.0 、压缩系数 $\alpha_{1-2} \geq 0.5\text{MPa}^{-1}$ 、承载力 $\leq 100\text{kPa}$ ，易产生长期固结沉降，某沿海桥梁因处理不当，通车3年墩台沉降达80mm致桥面开裂；岩质地基分布于山区，以花岗岩等硬质岩石为主，承载力 $\geq 500\text{kPa}$ 但易有裂隙、溶洞，某山区桥梁因隐蔽溶洞未处理，墩台浇筑后坍塌下沉50mm；填土地基多见于城市周边，成分复杂、压实度 $\leq 85\%$ 、均匀性差，易出现工后沉降，某互通桥梁因压实度不足，通车1年不均匀沉降20mm致支座失衡。

二、高速公路桥梁地基处理常用技术及操作要点

（一）软土地基处理技术及要点

1. 换填垫层法：适用于软土层厚度 $\leq 3\text{m}$ 的浅层软土地基，通过将表层软土挖除，换填级配砂石、碎石、灰土等强度高、压缩性低的材料，分层压实（压实度 $\geq 96\%$ ），形成垫层，提升地基承载力。操作要点包括：①确定换填深度与范围，换填深度需超过软土层厚度，范围需超出墩台基础边缘1.5~2.0m，避免侧向挤出；②控制垫层材料级配，砂石垫层需选用粒径5~30mm的级配砂石，含泥量 $\leq 5\%$ ；③分层压实，每层虚铺厚度20~30cm，采用重型压路机碾压，压实度需经检测合格后再进行下一层施工。例如某平原高速公路桥梁，采用30cm厚级配砂石垫层处理浅层软土地基，处理后地基承载力提升至180kPa，满足设计要求。^[2]

2. 排水固结法：适用于软土层厚度3~10m的深厚软土地基，通过设置排水系统（如塑料排水板、砂井），加速软土中水分排出，促进软土固结，提升地基承载力。操作要点包括：①布置排水系统，塑料排水板需垂直插入软土层底部，间距1.0~1.5m，砂井直径30~50cm，深度需穿透软土层；②施加预压荷载，采用堆载预压（堆载强度 \geq 设计荷载的1.2倍）或真空预压（真空度 $\geq 80\text{kPa}$ ），预压时间根据固结度确定，通常需6~12个月，确保固结度 $\geq 85\%$ ；③监测沉降与孔隙水压力，预压期间每周监测1次沉降，当连续2周沉降速率 $\leq 2\text{mm/周}$ 时，可停止预压。例如某沿海高速公路桥梁，采用塑料排水板+真空预压处理深厚软土地基，预压后软土压缩模量提升3倍，工后沉降控制在25mm以内。

3. 复合地基法：适用于软土层厚度5~15m的软土地基，通过在软土中设置增强体（如水泥土搅拌桩、碎石桩、CFG桩），与软土共同承担荷载，形成复合地基，提升承载力与稳定性。操作要点包括：①选择增强体类型，水泥土搅拌桩适用于含水量高的软土，桩径50~60cm，水泥掺量 $\geq 15\%$ ；CFG桩适用于承载力要求高的区域，桩径40~50cm，混凝土强度等级 $\geq \text{C20}$ ；②控制桩体施工质量，搅拌桩需确保搅拌均匀，无断桩、缩颈现象；CFG桩需控制沉管深度与拔管速度，避免桩身离析；③检测复合地基

承载力，采用平板载荷试验，复合地基承载力需 \geq 设计值的1.1倍。例如某高速公路特大桥，采用CFG桩复合地基处理软土地基，桩长12m，桩间距1.2m，处理后复合地基承载力达300kPa，满足特大跨度桥梁的荷载要求。

（二）岩质地基处理技术及要点

1. 裂隙封堵法：适用于裂隙发育的岩质地基，通过注浆（水泥浆、水泥砂浆）封堵岩石裂隙，防止地下水渗入，增强岩石整体性。操作要点包括：①勘察裂隙分布，采用地质雷达、钻孔取芯等方式，确定裂隙走向、宽度、深度；②布置注浆孔，注浆孔需沿裂隙走向布置，孔距2~3m，深度需穿透裂隙发育层；③控制注浆参数，水泥浆水灰比1:1~1:1.5，注浆压力0.5~1.0MPa，采用分段注浆方式，确保浆液填满裂隙，注浆结束后需钻芯检测，裂隙填充率需 $\geq 90\%$ 。例如某山区高速公路桥梁，岩质地基存在2~5mm宽裂隙，采用水泥浆注浆封堵后，岩石整体性显著提升，抗渗系数降低1个数量级。

2. 溶洞处理法：适用于存在溶洞的岩质地基，根据溶洞大小与填充情况，采用回填法、支撑法或跨越法处理。操作要点包括：①探测溶洞规模，通过钻孔、地质雷达确定溶洞位置、尺寸、填充介质（如空洞、淤泥、碎石）；②选择处理方案，小型溶洞（直径 $\leq 2\text{m}$ ）采用碎石+水泥浆回填，分层压实；中型溶洞（直径2~5m）采用钢筋混凝土盖板支撑；大型溶洞（直径 $> 5\text{m}$ ）采用桥梁桩基跨越，桩基需嵌入溶洞底部稳定岩层 $\geq 3\text{m}$ ；③检测处理效果，回填后需进行平板载荷试验，支撑结构需进行强度检测，确保满足承载要求。例如某高速公路桥梁，岩质地基存在直径3m的空洞型溶洞，采用钢筋混凝土盖板（厚度50cm）支撑处理后，地基承载力达600kPa，满足墩台荷载要求。^[3]

3. 风化层处理法：适用于风化层较厚（厚度 $> 3\text{m}$ ）的岩质地基，通过挖除风化层或加固风化层，确保地基稳定性。操作要点包括：①区分风化程度，采用钻孔取芯确定风化层类型（全风化、强风化、中风化），全风化层需全部挖除，强风化层可采用注浆加固；②挖除风化层时，需控制开挖坡度（1:1.5~1:2.0），避免边坡坍塌；③加固强风化层时，采用水泥-水玻璃双液注浆，水玻璃掺量10%~15%，注浆压力0.8~1.2MPa，加固后强风化层承载力需 $\geq 300\text{kPa}$ 。例如某山区高速公路桥梁，岩质地基全风化层厚度5m，挖除后换填碎石垫层，处理后地基承载力达450kPa，满足设计要求。

（三）填土地基处理技术及要点

1. 分层压实法：适用于填土层厚度 $\leq 5\text{m}$ 、成分较均匀的填土地基，通过分层开挖-回填-压实，提升填土压实度与均匀性。操作要点包括：①划分压实分层，每层压实厚度20~30cm，开挖时需按分层标高控制，避免超挖；②选择压实机械，采用重型振动压路机（吨位 $\geq 20\text{t}$ ），碾压次数6~8遍，碾压速度2~3km/h；③检测压实度，每层压实度需 $\geq 96\%$ （上路床标准），采用环刀法或灌砂法检测，合格后再进行下一层施工。例如某高速公路互通桥梁，填土地基采用分层压实处理，压实度达97.5%，处理后地基承载力提升至220kPa，工后沉降控制在15mm以内。

2. 强夯法：适用于填土层厚度5~10m、含碎石较多的填土地

基，通过重锤（10–30t）自由下落（落距8–15m）产生的冲击能，压实填土，减少孔隙率。操作要点包括：①确定强夯参数，根据填土厚度确定锤重、落距、夯点间距（3–5m）、夯击次数（每点6–8击）；②划分夯击区域，按“先边缘后中间、隔点夯击”的顺序施工，避免填土侧向位移；③检测处理效果，强夯后需检测地基承载力（ $\geq 200\text{kPa}$ ）与压缩模量，同时监测沉降，确保工后沉降 $\leq 30\text{mm}$ 。例如某高速公路服务区桥梁，填土地基厚度8m，采用20t重锤、12m落距强夯处理，处理后填土孔隙率从35%降至18%，承载力达250kPa。^[4]

三、高速公路桥梁地基处理施工质量控制措施

（一）强化施工过程监测

1. 沉降监测：在地基处理区域布设沉降观测点（墩台基础周边每5–10m1个点），采用水准仪按频次监测——预压期间每周1次，施工期间每3天1次，通车后每月1次，记录沉降数据，绘制沉降曲线，当沉降速率 $> 5\text{mm/天}$ 或累计沉降超限时，需暂停施工，分析原因并调整处理方案。例如某软土地基桥梁，沉降监测发现某观测点单日沉降达8mm，及时增加塑料排水板密度，控制沉降速率降至2mm/天以内。^[5]

2. 承载力监测：采用平板载荷试验、静力触探试验等方式，检测地基处理后的承载力——换填垫层法需在垫层施工完成后检测，复合地基法需在桩体养护28天后检测，强夯法需在施工完成1个月后检测，承载力需满足设计要求的1.1倍以上，若不达标，需重新进行地基处理。例如某填土地基桥梁，强夯后承载力检测仅180kPa（设计要求200kPa），补充2遍强夯后，承载力提升至220kPa。

3. 施工参数监测：实时监测关键施工参数，如注浆加固时的

注浆压力、浆液流量；搅拌桩施工时的搅拌速度、水泥掺量；强夯施工时的锤重、落距、夯击次数，确保参数符合设计要求。例如注浆施工中，若注浆压力突然下降，可能存在浆液泄漏，需停止注浆，查找泄漏点并封堵后再继续施工。

（二）严格材料质量管控

1. 垫层材料管控：换填用砂石、碎石需检测级配、含泥量、压实系数，级配需符合设计要求（如砂石垫层粒径5–30mm），含泥量 $\leq 5\%$ ，压实系数 ≥ 0.96 ；灰土垫层需控制石灰含量（ $\geq 10\%$ ），石灰需为Ⅲ级以上，活性氧化钙含量 $\geq 70\%$ ，避免使用受潮或过期石灰。

2. 注浆材料管控：水泥需选用P.O42.5级普通硅酸盐水泥，检测强度、安定性，确保合格；水玻璃需检测模数（2.4–3.0）、浓度（40–50Be'）；浆液配比需按设计要求配制，搅拌均匀，每批次浆液需制作试块，检测28天强度，强度需 \geq 设计值（如水泥浆试块强度 $\geq 15\text{MPa}$ ）。^[6]

3. 桩体材料管控：CFG桩用混凝土需检测坍落度（180–220mm）、抗压强度（ $\geq \text{C}20$ ），每50m³制作1组试块；水泥土搅拌桩用水泥需检测细度、初凝时间，搅拌时水泥掺量需按设计值（ $\geq 15\%$ ）控制，避免掺量不足导致桩体强度不够。

四、结语

高速公路桥梁地基处理是桥梁建设的基础工程，其技术要点需结合地质条件动态调整——软土地基需重点解决沉降与承载力问题，岩质地基需聚焦裂隙与溶洞处理，填土地基需强化压实与均匀性控制。在施工过程中，需通过强化过程监测、严格材料管控、推动技术创新等，这样才能确保地基处理质量达标。

参考文献

- [1] 张明. 公路桥梁工程软土地基施工处理技术要点分析 [J]. 青海交通科技, 2022, 34(3): 54–56.
- [2] 赵乾. 公路桥梁施工技术中软土地基处理研究——以S06酒（泉）嘉（峪关）环线高速公路项目为例 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(10): 79–83.
- [3] 崔亚超. 公路路基和桥梁工程施工中的质量控制对策 [J]. 建筑技术开发, 2022, 49(14): 134–136.
- [4] 王刚. 高速公路软土路基桥涵过渡段差异沉降研究 [J]. 西部交通科技, 2024, (1): 14–17.
- [5] 杜占涛, 万雷. 软土路基过渡段压实质量检测方法与关键控制指标研究 [J]. 工程机械, 2023, 54(9): 129–133.
- [6] 邹韬, 邹仕印. 探究公路与桥梁施工的质量管理方法 [J]. 江西建材, 2015, (22): 187.