

Key technology and engineering practice of highway subgrade construction under complex geological conditions

Linhua Ma

Road Maintenance Development Center, Yanyuan County, Liangshan Prefecture, Liangshan, Sichuan, 615700, China

Abstract

In highway engineering, complex geological conditions are the core factor affecting the quality and safety of subgrade construction. Their presence can easily lead to subgrade settlement, slope instability, and other defects that threaten the operational lifespan of highways. This paper focuses on complex geological conditions (soft soil, karst, high fill, permafrost, etc.), analyzes construction challenges, and explores targeted key technologies. These include vacuum preloading combined with plastic drainage boards for soft soil foundation treatment, grouting reinforcement and karst cave filling techniques for karst geological conditions, layered rolling and dynamic compaction reinforcement for high fill subgrades, and thermal insulation protection for permafrost subgrades. Practical engineering cases are used to verify the effectiveness of these technologies. Results show that targeted technologies can effectively address complex geological construction challenges, enhance subgrade bearing capacity and stability, and provide technical references for similar projects.

Keywords

complex geology; highway roadbed; construction technology; foundation treatment; engineering practice

复杂地质条件下公路路基施工关键技术及工程实践

马林华

四川省凉山州盐源县公路养护事业发展中心，中国·四川凉山 615700

摘要

公路工程建设中，复杂地质条件是影响路基施工质量与安全的核心因素，其存在易导致路基沉降、边坡失稳等病害，威胁公路运营寿命。本文以复杂地质（软土、岩溶、高填方、冻土等）为研究对象，结合施工难点分析，深入探讨针对性关键技术，包括软土地基处理的真空预压联合塑料排水板技术、岩溶地质的注浆加固与溶洞充填技术、高填方路基的分层碾压与强夯补强技术及冻土路基的保温防护技术，并依托实际工程案例验证技术应用效果。结果表明，针对性技术可有效解决复杂地质施工难题，提升路基承载能力与稳定性，为同类工程提供技术参考。

关键词

复杂地质；公路路基；施工技术；地基处理；工程实践

1 引言

随着我国公路网向山区、高原等复杂地质区域延伸，路基施工面临的地质环境愈发复杂。复杂地质条件下，路基不仅需承受车辆荷载，还需抵御地质灾害与自然环境的影响，施工难度显著增加^[1]。若技术应用不当，易引发路基开裂、沉降等病害，增加后期维护成本，甚至危及行车安全。目前，部分工程存在技术选择与地质条件不匹配、施工工艺把控不严等问题，导致工程质量难以达标。因此，深入研究复杂地质下公路路基施工关键技术，结合工程实践优化技术方案，对保障公路工程质量与安全具有重要现实意义^[2]。

【作者简介】马林华，彝族，男，中国四川盐源人，本科，从事道路与桥梁研究。

2 复杂地质条件类型及公路路基施工难点

2.1 主要复杂地质类型

土地工程地质分类是工程学中依据土石坚硬程度与施工开挖难易程度划分的岩土工程分类体系。其核心标准将土石分为松软土、普通土、坚土、砂砾坚土、软石、次坚石、坚石、特坚石八类，对应通用 8 级土石分级。该分类以坚实系数 (f) 为关键参数，参考普氏岩石强度系数，用于指导建筑施工中的土方开挖、地基处理及工程量测算。该系统包含一般性、局部性和专门性三类基本分类类型，并采用三级分类原则：第一级按地质成因划分为残积土、坡积土等，第二级基于颗粒级配或塑性指标划分碎石土、砂土等，第三级结合工程需求细化具体指标。其中，碎石土按粒径界定为漂石、块石等，砂土依据粒度细分为砾砂、粗砂等五种^[3]。

而公路工程中常见的复杂地质包括软土地基、岩溶地

质、高填方地质及冻土地质，各类地质的特性差异显著，对路基施工的要求也各不相同。软土地基主要由淤泥、淤泥质土等组成，具有含水量高、孔隙比大、压缩性高及承载能力低的特点；岩溶地质因石灰岩等可溶性岩石受地下水溶蚀，形成溶洞、溶沟等地质构造，地质结构不稳定；高填方地质多出现于山区公路建设中，填方高度大，易因填料压实度不足导致路基沉降；冻土地质分为季节性冻土与多年冻土，受温度变化影响，冻土冻融循环会导致路基冻胀、融沉^[4]。

2.2 施工难点

复杂地质条件下公路路基施工面临诸多难点，首先是地基处理难度大，软土地基需解决地基承载力不足问题，若处理不当，路基易产生不均匀沉降；岩溶地质中，溶洞的存在会导致路基下方空洞，引发路基塌陷，且溶洞位置与大小难以精准探测，增加处理难度。其次是路基稳定性控制难，高填方路基在填筑过程中，若分层厚度过大或碾压强度不足，填料难以达到设计压实度，路基后期易出现沉降变形；冻土路基受温度变化影响，冻融循环会破坏路基结构，导致路基冻胀隆起、融沉凹陷，影响路基稳定性。最后是施工质量把控难，复杂地质条件下，施工环境复杂，如冻土区低温环境影响施工机械效率与材料性能，岩溶区隐蔽性地质问题难以及时发现，均增加施工质量控制难度^[5]。

3 复杂地质条件下公路路基施工关键技术

3.1 软土地基路基施工技术

公路路基工程作为公路建设的核心组成部分，其施工需遵照《公路路基施工技术规范》(JTJ 033-95)技术要求，涵盖路基本体施工、排水系统设计、防护加固工程等全流程环节。施工过程涉及高精度测量复测、试验路段设置及 13 类特殊地质条件处理要求，其中机械配置需符合专业承包资质标准规定的挖掘机、压路机等技术装备参数。质量控制方面要求执行填料 CBR 值检测与压实度监测，采用夯实加固、灌浆排水等土壤改良技术应对承载力不足等问题。资质管理体系中一级资质企业须具备累计修建 100 公里一级公路路基的工程业绩，技术负责人须持有公路工程相关专业高级职称。针对软土地基承载能力低、压缩性高的问题，真空预压联合塑料排水板技术是有效的处理手段。该技术通过在软土地基中设置塑料排水板，形成排水通道，再利用真空预压设备对地基施加负压，加速地基土中水分排出，提高地基土密实度与承载能力。施工过程中，需严格把控关键工序。首先是塑料排水板铺设，排水板需垂直插入地基，插入深度根据地基软土厚度确定，一般需穿透软土层至下卧硬土层，确保排水通道畅通；排水板间距需根据地基处理面积与工期要求合理设计，通常控制在 1.5 ~ 2.0m，避免间距过大影响排水效率。二是设置真空预压系统，在铺设密封膜前，应清除地基表面杂物，使密封膜和地基能够贴紧，防止漏气；真空管路宜平铺，真空泵功率需与预压面积相对应，确保地基各部

位均匀负压，真空度不少于 80kPa，并至少在设计值下持续时间不少于 3-6 个月。最后是预压监测，施工中对地基沉降量、真空度、孔隙水压力要实时监测，根据监测结果调整预压参数，保证地基处理效果达到设计标准。该技术在某沿海地区公路工程中应用于软土地基的处理，处理后地基承载力从 80kPa 提高到 180kPa，路基工后沉降量控制在 5cm 以内，达到设计要求。

3.2 岩溶地质路基施工技术——注浆加固与溶洞充填技术

岩溶地质路基施工的核心是溶洞等隐蔽性地质问题，利用注浆加固与溶洞充填技术可以有效提高岩溶地质路基的稳定性。该技术是通过对岩溶区域进行注浆，填充溶洞、溶沟等空洞，改善地质结构，提高地基承载能力。一是岩溶探测，施工前采用地质雷达、钻孔勘探等手段，对溶洞的位置、大小、埋深及充填情况进行准确地探测，绘制岩溶地质分布图，为注浆方案设计提供依据。对于小型溶洞（直径小于 2m），采用压力注浆，注浆材料为水泥浆，水泥强度等级不小于 P. O42.5，水灰比控制在 0.8-1.2，注浆压力根据溶洞埋深确定，一般为 0.5-1.0MPa，浆液要全部灌满溶洞；大型溶洞（直径大于 2m）先用块石、碎石填充溶洞后进行注浆加固，填料粒径根据溶洞的大小进行选择，填满密实后再灌水泥浆，加强填料与周围岩体的粘结力。注浆过程中要分段注浆，防止注浆压力太大使岩体开裂；注浆监测点也要设置注浆监测点，监测注浆量和注浆压力的变化，当注浆压力达到设计值后且注浆量不再增加时，就停止注浆。如某山区公路工程岩溶区域用该技术处理溶洞 32 个，注浆量 800m³，处理后路基承载能力明显提高，经检测路基压实度达 96% 以上，营运期间未出现路基塌陷等病害。

3.3 高填方路基施工技术——分层碾压与强夯补强技术

分层碾压高填方路基施工的关键是保证填料压实度，防止后期沉降，分层碾压与强夯补强技术结合能有效提升路基压实质量。分层碾压技术对填料分层厚度与碾压参数进行控制，使每一层填料均达到设计压实度；强夯补强技术是对分层碾压后的路基局部薄弱区进行加固，提高路基整体稳定性。分层碾压施工中的填料选择必须符合设计要求，优先采用级配好的碎石土、砂砾土等，避免使用淤泥、腐殖土等不良填料。分层厚度根据碾压机械性能确定，一般为 30 ~ 50cm，碾压机械选用重型振动压路机，碾压次数不少于 6 遍，碾压顺序为先两边后中间、先慢后快，确保填料均匀压实。碾压完成后，需及时检测填料压实度，采用灌砂法或环刀法检测，压实度需达到 95% 以上（高速公路标准），若未达标，需重新碾压。强夯补强施工需在分层碾压完成后进行，强夯点布置采用梅花形，间距根据路基宽度确定，一般为 4 ~ 6m，强夯能级根据填方高度选择，填方高度 5 ~ 10m 时，强夯能级为 1000-1500kN · m；填方高度大于 10m 时，

能级为 $1500\text{--}2000\text{kN}\cdot\text{m}$ 。强夯过程中，需监测路基沉降量，每遍强夯后沉降量需符合设计要求，一般最后两级沉降量差不大于 5cm 。某山区高速公路高填方路基工程，填方高度最大达 12m ，采用该技术施工，路基压实度均达到 96% 以上，工后沉降量控制在 3cm 以内，满足运营要求。

3.4 冻土路基施工技术——保温防护与排水防渗技术

冻土路基施工需重点控制冻融循环对路基的影响，保温防护与排水防渗技术可有效减少温度变化对冻土的破坏。保温防护技术是指在路基表面或路基内部设置保温层，减少外界温度对冻土的影响；排水防渗技术是指设置排水系统，防止地表水与地下水渗入冻土，避免冻土融化。保温层设置保温材料为聚苯乙烯泡沫板 EPS 板，厚度根据冻土的类型，季节性冻土区一般为 $10\sim15\text{cm}$ ，多年冻土区为 $20\sim30\text{cm}$ 。铺设保温层要在路基填筑完毕后进行，铺设前应清理路基表面，确保保温层与路基紧密贴合，保温层间采用搭接方式连接，搭接宽度不小于 10cm ，防止冷空气入侵。同时，在路基边坡处设置宽度不小于 2m 的保温护道。排水防渗系统包括地表排水与地下排水，地表排水通过设置截水沟、边沟等，将路基范围内的地表水引排至路基外侧；地下排水采用盲沟、渗沟等，盲沟设置在路基底部冻土上限以上，填充透水性材料如碎石，将地下水引排至路基外，防止地下水在冻土区聚集导致冻土融化。某高原公路冻土路基工程，采用该技术施工，EPS 保温层厚 25cm ，盲沟间距 10m ，运营期路基冻胀量控制在 2cm 以内，融沉量小于 3cm ，保证了公路正常运营。

4 工程实践案例分析

4.1 工程概况

A 省山区高速公路 K12+300-K12+800 段，全长 500m ，该路段穿越岩溶与高填方复合地质区域，其中 K12+300-K12+500 段为岩溶地质，溶洞分布密集，最大溶洞直径达 3m ，埋深 $5\sim8\text{m}$ ；K12+500-K12+800 段为高填方地质，填方高度 $6\sim10\text{m}$ ，填料主要为碎石土。该工程要求路基压实度不低于 96% ，工后沉降量小于 5cm ，运营期间无路基失稳病害。

4.2 施工技术方案

岩溶地质段（K12+300-K12+500）：采用注浆加固与溶洞充填技术，先通过地质雷达探测溶洞位置与大小，对直径小于 2m 的溶洞，采用 P. O42.5 水泥浆注浆，水灰比 1.0 ，注浆压力 0.8MPa ；对直径大于 2m 的溶洞，先填充块石（粒径 $20\sim30\text{cm}$ ），再注入水泥浆，注浆压力 1.0MPa 。高填

方地质段（K12+500-K12+800）：采用分层碾压与强夯补强技术，填料选用级配碎石土，分层厚度 40cm ，采用 20t 振动压路机碾压 6 遍，碾压完成后检测压实度；强夯补强能级选用 $1500\text{kN}\cdot\text{m}$ ，强夯点间距 5m ，梅花形布置，共进行 2 遍强夯。

4.3 施工效果检测与分析

采用灌砂法检测，岩溶地质段路基压实度平均值为 96.5% ，高填方段平均值为 97.2% ，均满足设计要求（ $\geq96\%$ ）。采用重型动力触探试验检测，岩溶地质段地基承载力平均值为 200kPa ，高填方段路基顶面承载力平均值为 220kPa ，符合设计标准（ $\geq180\text{kPa}$ ）。运营 1 年后，对路基沉降量进行监测，该路段最大沉降量为 3.8cm ，小于设计要求的 5cm ，无不均匀沉降现象。该工程实践表明，针对复杂复合地质条件，采用针对性的施工技术方案，可有效解决施工难题，保障路基施工质量与稳定性，为同类复合地质公路路基施工提供了实践参考。

5 结论

复杂地质条件下公路路基施工需结合地质特性，针对性选择施工技术，才能保障路基质量与安全。本文通过分析软土、岩溶、高填方、冻土等复杂地质的施工难点，提出了真空预压联合塑料排水板、注浆加固与溶洞充填、分层碾压与强夯补强及保温防护与排水防渗等关键技术，并结合工程实践验证了技术有效性。研究表明，软土地基采用真空预压联合塑料排水板技术可显著提高地基承载能力；岩溶地质通过注浆加固与溶洞充填技术可解决隐蔽性空洞问题；高填方路基采用分层碾压与强夯补强技术能有效控制压实度与工后沉降；冻土路基采用保温防护与排水防渗技术可减少冻融循环影响。工程实践案例进一步证明，针对性技术方案可满足复杂地质路基施工要求，提升工程质量。

参考文献

- [1] 王亚娟.公路路基施工质量控制关键技术研究[J].城市建设,2025,(20):32-34.
- [2] 邢若斌.公路工程现浇赤泥轻质路基施工关键技术[J].交通世界,2025,(19):131-133.
- [3] 胡松.高速公路改扩建路基拼宽施工关键技术[J].建筑机械,2025,(06):155-159.
- [4] 王佳音.水泥搅拌桩在公路软土路基处理中的应用[J].石河子科技,2025,(03):68-69.
- [5] 孙斌.高速公路高填方路堤施工关键技术探究[J].江西建材,2025,(05):282-284.