

公路路基路面设计中软基的处理技术研究

任修奎

河南省新乡公路桥梁建设有限责任公司 河南 新乡 453000

摘要:公路路基路面设计中,软基处理是保障工程质量的关键。软基具有高压缩性、低抗剪强度、透水性小等特性,易引发沉降变形和稳定性问题。处理技术涵盖物理法(如换填、排水固结、强夯)、化学法(如水泥搅拌桩、高压喷射注浆)、复合地基技术(如CFG桩、碎石桩)及新型技术(如真空预压联合堆载、生态加固)。需结合地质条件、经济性与工期要求,科学选型并优化参数,以提升地基承载力、控制沉降,确保公路长期稳定运行。

关键词:公路路基;路面设计;软基;处理技术

引言:在公路建设中,软土地基因其天然含水量高、压缩性大、抗剪强度低等特性,成为影响路基路面稳定性的关键因素。若处理不当,易引发不均匀沉降、路面开裂等病害,威胁行车安全并增加后期维护成本。当前,软基处理技术多样,涵盖物理改良、化学加固、复合地基及新型环保方法,但不同技术的适用性、经济性与效果差异显著。因此,系统研究软基处理技术,结合工程实际优化设计参数,对提升公路建设质量、保障长期运营安全具有重要意义。

1 公路路基路面设计中软土地基的工程特性与分类

1.1 软土的定义与形成条件

(1)软土是指在静水或缓慢流水环境中沉积形成,富含亲水性矿物,天然含水量高、压缩性大、抗剪强度低、渗透性小的软弱土层。其形成需具备特定条件:一是充足的水分环境,如滨海、湖沼、河滩、谷地等低洼积水区域,为软土沉积提供空间;二是丰富的细颗粒物质来源,河流冲积、湖泊淤积及滨海沉积过程中,黏土、粉质黏土等细颗粒物质持续堆积;三是缓慢的沉积速率,使得颗粒间水分难以排出,逐渐形成饱和软塑或流塑状态的土层^[1]。(2)软土的物理力学指标具有显著特征:天然含水量通常大于液限,多在30%~70%之间,部分可达100%以上;压缩性极高,压缩系数 a_{1-2} 普遍大于 0.5MPa^{-1} ,属于高压缩性土,受荷载后易产生大幅压缩变形;抗剪强度极低,不排水抗剪强度一般小于 20kPa ,且随含水量增加而降低,稳定性极差;渗透性微弱,渗透系数多在 $10^{-6}\sim 10^{-8}\text{cm/s}$ 之间,排水固结过程缓慢。

1.2 软土地基的工程问题

(1)沉降变形问题:软土地基在公路荷载作用下,易产生两种典型沉降。一是不均匀沉降,由于软土分布不均、厚度变化大,或路基填料压实度差异,导致路基各部位沉降量不同,进而引发路面开裂、错台等病害;二

是工后沉降,软土排水固结周期长,公路通车后仍会持续产生沉降,若工后沉降量超过规范限值,会影响行车舒适性和安全性,严重时需对路面进行大规模修复。(2)稳定性问题:软土抗剪强度低,在路基自重、行车荷载及外部环境影响下,易出现稳定性隐患。一方面易发生滑坡,当路基边坡坡度过大或受到雨水浸泡时,软土抗剪强度进一步降低,边坡土体失去平衡引发滑动;另一方面存在侧向位移风险,路基荷载作用下,软土地基会产生水平方向的侧向挤压变形,导致路基边缘鼓胀、坍塌,破坏路基整体结构。

1.3 软土分类与分布特征

(1)按成因分类:主要包括滨海沉积软土、湖沼沉积软土、河滩沉积软土、谷地沉积软土四类。滨海沉积软土分布于沿海平原及河口三角洲地区,受海水影响,土层含盐量高,颗粒细腻,厚度大且分布连续;湖沼沉积软土形成于内陆湖泊、沼泽区域,富含腐殖质,呈暗黑色,含水量极高,压缩性更强;河滩沉积软土分布于河流两岸漫滩地带,受河流冲积作用形成,土层厚度不均,常夹有砂层透镜体;谷地沉积软土分布于山间谷地,多由山洪堆积或地下水补给形成,分布范围较小但厚度变化大^[2]。(2)按工程性质分类:可分为高压缩性软土、低强度软土、高含水量软土、有机质软土等。高压缩性软土压缩系数 a_{1-2} 大于 1.0MPa^{-1} ,受荷载后压缩变形显著;低强度软土不排水抗剪强度小于 15kPa ,稳定性极差,需进行深度处理;高含水量软土天然含水量大于80%,呈流塑状态,承载力极低;有机质软土含腐殖质等有机质,腐蚀性较强,且会降低土体强度和稳定性,处理难度更大。

2 公路路基路面设计中软基处理技术

2.1 物理处理方法

(1)换填法:适用条件为浅层软土(厚度通常小于3m)、软土分布不均且承载力要求较低的公路路段,尤

其适用于软土含水量较高但未达流塑状态的区域。施工要点包括：先明确软土分布范围与厚度，采用机械或人工开挖清除软土，开挖过程中做好排水防淤措施；换填材料选用级配良好的碎石、砂砾、灰土等强度高、渗透性好的材料，分层摊铺压实，每层厚度控制在20-30cm，压实度需达到95%以上，确保换填层与原地基紧密衔接，避免出现沉降差。(2) 排水固结法：核心是通过设置排水通道加速软土排水固结，提高土体强度。主要包括三种形式：砂井排水，采用沉管法或水冲法施工，砂井直径30-50cm，间距2-4m，形成竖向排水通道，搭配砂垫层横向排水；塑料排水板排水，排水板宽度10-15cm，厚度3-5mm，采用插板机植入软土，具有施工便捷、排水效率高的优势，适用于大面积软基处理；堆载预压法，在排水系统铺设完成后，分级施加堆载（如土石填料），使软土在荷载作用下逐步排水固结，堆载速率需控制，避免引发地基失稳，适用于工期相对充裕的项目。(3) 强夯法：机理是利用重锤（10-40t）从高处（8-20m）自由下落产生的冲击能，对软土地基进行夯实，使土体颗粒重新排列、密实，减少孔隙率，提高承载力。适用土层为含少量黏性土的砂性软土、粉土地基，或软土厚度较薄且下卧层承载力较高的区域；不适用于饱和软黏土，易因夯击产生橡皮泥效应，加剧地基变形^[3]。

2.2 化学处理方法

(1) 水泥搅拌桩：分为湿法和干法两种施工工艺。湿法（深层搅拌法）是将水泥浆与软土在深层搅拌均匀，形成水泥土桩，适用于含水量较高的软土，施工时需控制水泥浆浓度（水灰比0.5-0.7）和搅拌次数，确保搅拌均匀；干法（粉体喷射搅拌法）是将水泥粉直接喷射至软土中，通过搅拌使其与软土反应硬结，适用于含水量较低的软土，需控制粉体喷射量和搅拌深度。设计参数方面，桩径通常为50-60cm，桩间距1.2-2.0m，水泥掺量占软土干重的10%-15%，单桩承载力需根据地质条件计算确定。(2) 高压喷射注浆法：根据喷射介质不同分为单管、双管、三管法。单管法仅喷射水泥浆，设备简单，适用于处理深度较浅（小于15m）的软土；双管法同时喷射水泥浆和压缩空气，空气包裹水泥浆形成射流，提高喷射范围和搅拌效果，处理深度可达20m；三管法喷射水、压缩空气和水泥浆，高压水射流先切割土体，再由水泥浆填充固结，适用于含较多杂质或粒径较大颗粒的软土，处理深度最深可达30m。该技术形成的固结体强度高，可有效提高地基承载力。

2.3 复合地基技术

(1) 刚性桩复合地基：核心桩型包括CFG桩和PHC管

桩。CFG桩（水泥粉煤灰碎石桩）由水泥、粉煤灰、碎石等混合料制成，具有强度高、承载力大的特点，桩径40-60cm，适用于深厚软土地基，通过桩体承担大部分荷载，减少地基沉降；PHC管桩为预应力高强度混凝土管桩，抗折、抗压性能优异，施工速度快，适用于对承载力要求高且工期紧张的公路项目，需在桩顶设置褥垫层，协调桩与地基土的变形^[4]。(2) 柔性桩复合地基：主要包括碎石桩和砂桩。碎石桩采用振动沉管法施工，将碎石填入桩管并振动密实，形成竖向排水和承载桩体，适用于砂性软土或粉土质地基，可提高地基承载力并加速排水固结；砂桩与碎石桩机理相似，采用砂料填充，适用于含水量较高的黏性软土，通过砂桩的排水作用促进软土固结，桩径通常为30-50cm，间距1.5-3.0m。

2.4 新型处理技术

(1) 真空预压联合堆载法：结合真空预压和堆载预压的优势，通过在软基表面铺设密封膜，利用真空泵形成真空负压，同时施加堆载，加速软土排水固结。该技术解决了单纯真空预压荷载不足、单纯堆载预压易失稳的问题，适用于深厚软土地基，可缩短固结工期30%-50%，提高地基处理效果。(2) 生态加固技术：属于环保型处理技术，主要包括植物纤维加固和生物酶固化。植物纤维加固是将秸秆、椰壳纤维等天然纤维掺入软土中，通过纤维的拉结作用提高土体整体性和抗剪强度，适用于浅层软土处理，成本低且环保；生物酶固化是利用生物酶促进软土颗粒胶结，降低土体含水量，提高承载力，适用于中小型公路项目的软基处理，对环境无污染。

2.5 技术适用性对比分析

(1) 不同地质条件下的技术选择：浅层软土（厚度 < 3m）优先选用换填法、浅层强夯法，施工简便且成本低；深厚软土（厚度 > 5m）宜采用排水固结法、CFG桩复合地基或真空预压联合堆载法，确保处理深度和加固效果；含砂性颗粒的软土可选用碎石桩、强夯法，利用颗粒密实提高强度；饱和黏性软土需避免强夯法，优先采用水泥搅拌桩、高压喷射注浆法。(2) 经济性与工期对比：换填法、砂桩等技术材料易得、施工简单，经济性最优，但工期受处理面积影响较大；强夯法、高压喷射注浆法施工速度快，工期较短，但设备租赁和材料成本较高；真空预压联合堆载法工期较短，处理效果好，但需投入密封膜、真空泵等专用设备，初期投资较大；生态加固技术成本较低，但适用范围有限，工期略长于机械加固技术。实际设计中需结合项目预算和工期要求综合选择。

3 公路路基路面设计中软基处理设计与参数优化

3.1 设计原则与流程

设计需遵循因地制宜、技术可行、经济合理、安全可靠的原则，核心流程围绕勘察、目标设定、方案选型、参数计算、优化验证展开。(1) 勘察要求：需通过地质钻探和原位测试全面掌握软土特性。地质钻探应按规范布置钻孔，深度需穿透软土层至下卧硬层，明确软土分布范围、厚度及分层情况；原位测试重点采用静力触探、十字板剪切试验等方法，精准获取软土天然含水量、压缩性、抗剪强度、渗透性等核心指标，为设计方案选型和参数计算提供基础数据。(2) 处理目标设定：核心包括沉降控制标准和承载力要求。沉降控制需符合公路等级相关规范，高速公路、一级公路工后沉降通常控制在15cm以内，不均匀沉降差不超过1%；承载力要求需根据路基受力情况确定，经处理后的地基承载力特征值应满足路基自重及行车荷载需求，一般不低于180kPa，确保路基长期稳定。

3.2 关键设计参数计算

(1) 排水固结法设计：核心参数为固结度计算和预压时间。固结度计算采用太沙基固结理论，结合软土渗透系数、排水路径长度等参数，确定不同工期对应的固结度，设计要求预压期末固结度不低于85%；预压时间根据固结度计算结果和工程工期综合确定，需预留充足时间确保软土完成大部分固结，减少工后沉降，可通过增设排水通道缩短预压周期。(2) 复合地基承载力计算：关键参数为面积置换率和桩土应力比。面积置换率根据复合地基承载力要求、桩体强度及天然地基承载力计算确定，刚性桩复合地基置换率通常为10%~25%，柔性桩为20%~35%；桩土应力比需通过试验或经验公式估算，刚性桩桩土应力比一般为2~5，柔性桩为1.5~3，计算时需确保桩体与地基土协同工作，充分发挥两者承载能力^[5]。

3.3 数值模拟与参数优化

(1) 有限元模型建立：常用PLAXIS、ABAQUS等有

限元软件，模型需真实还原工程地质条件、软基处理方案及荷载工况。建模时需合理划分网格，软土区域采用弹塑性本构模型（如摩尔-库仑模型），桩体采用线弹性模型，准确输入勘察获取的土体及材料参数，模拟路基施工全过程及运营期的受力变形特性。(2) 参数敏感性分析：针对桩长、桩间距、材料强度等关键参数开展分析，明确各参数对地基沉降和承载力的影响程度。通过调整参数取值，对比不同参数组合下的模拟结果，优化确定最优参数方案。例如，增加桩长可显著降低沉降但提升成本，需通过敏感性分析找到沉降控制与经济性的平衡点，确保设计方案最优。

结束语

公路路基路面设计中的软基处理是保障工程质量与耐久性的核心环节。通过物理、化学、复合地基及新型技术的综合应用，可有效改善软土力学性能、控制沉降变形并提升地基承载力。然而，不同技术的适用性受地质条件、经济性及工期等因素制约，需结合工程实际科学选型与参数优化。未来，随着环保要求提升与技术创新，生态加固、智能监测等绿色高效技术将成为发展方向，为公路建设提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1]王立民.公路路基路面设计过程中的软基处理技术[J].北方建筑,2024,9(06):119-122.
- [2]何江波.公路路基路面设计过程中的软基处理分析[J].散装水泥,2024,(05):77-78.
- [3]孙伟.公路路基路面设计中的软基处理分析[J].汽车周刊,2024,(09):214-216.
- [4]汪胜.公路路基路面设计中软基的处理技术研究[J].四川水泥,2021,(09):231-232.
- [5]周晶晶,周文轩.软基处理技术在公路路基路面设计过程中的应用[J].科学技术创新,2025,(13):109-112.