

新型土工合成材料在公路路基加固中的性能分析

范卫华

(建德市交通设计有限公司, 浙江 杭州 311600)

摘要 在公路建设中, 土工合成材料凭借其优异的加筋、排水和隔离性能, 已成为现代路基工程不可或缺的核心材料, 但新型土工合成材料在实践中还面临着耐久性不足、力学性能衰减、与土体界面黏结性能较差和适应性较差的困境。本文对上述性能改善难点进行了分析, 提出了发展高耐候性复合材料、引进纳米增强技术以及多向编织结构、完善材料表面结构设计、开发出适用于不同地质环境的定制化材料体系等性能改善策略, 以期能够为公路路基加固工作提供有益参考。

关键词 土工合成材料; 公路路基加固; 性能提升

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.023

0 引言

土工合成材料因轻质、高强和耐久的特点而被广泛地应用于公路路基的加固。但随着公路建设不断扩展到复杂地质条件及恶劣环境中, 新型土工合成材料的性能提升也遇到了新的考验。本文通过对新型土工合成材料在公路路基加固中的应用背景进行分析, 探究其性能提升所面临的困境, 进而提出解决策略, 旨在为促进我国公路建设提供参考。

1 土工合成材料在公路路基加固中的应用背景

随着我国交通基础设施建设的不断扩大, 对道路使用年限及通行能力有了更高的要求, 而传统的填土、夯实及碎石垫层加固方法在一些复杂地质条件及极端气候环境下也逐渐显露出其局限性。土工合成材料是高分子工程材料的一种, 具有重量轻、强度大、施工方便的特点, 对路基稳定性的增强, 沉降的控制和排水功能的提高表现出了明显的优越性。尤其适用于软土地基、高填方地段、湿陷性土壤区或者边坡加固工程, 它的作用是无法取代的^[1]。随着材料科学的发展, 一系列新型土工合成材料相继问世, 主要有增强型土工格栅、高分子复合膜和多功能土工织物系列, 除了满足力学性能外, 还更关注耐久性与环境适应能力。

2 新型土工合成材料在公路路基加固中的性能提升难题

2.1 材料耐久性不足, 易受环境因素(紫外线、湿热、冻融等)影响

目前使用的新型土工合成材料虽然在初期性能测试方面具有优异的性能, 但是在实际工程环境下, 其

服役条件是复杂多样的, 长期受紫外线照射、高湿极寒和反复干湿交替的自然因素影响, 性能的稳定性的不是很好。以高原或者高温区域为例, 当太阳辐射强度达到实验室规定标准时, 一些材料表层几个月后就会发生脆化、变色甚至微裂纹等现象, 这一结构层级上的损伤很容易诱发性能的全面劣化。而且在我国南方多雨地区或者沿海湿热地区, 长期处于高湿度、高盐分条件下的空气, 很容易加快材料一些化学组分特别是织物类复合材料的时效, 受潮膨胀和干燥收缩相间时, 易发生剥离或者分层。另外, 我国北方冬季寒冷地区土体和材料之间冻融循环频繁, 使材料受到微观疲劳的积累, 当抗冻性能不充分时就会诱导强度降低或者界面失效。

2.2 拉伸强度和剪切性能在复杂工况下衰减明显

土工合成材料拉伸强度与剪切能力在静态实验中往往会呈现理想值, 但是将它们放置于复杂且受多重应力综合影响的路基体系时, 往往很难维持设计预期的真实承载性能。很多材料面对拉压混合荷载、边界应力集中以及不均匀沉降等情况, 其力学性能呈现出非线性退化的趋势, 特别是地震荷载作用下的力学性能、在高速冲击振动或者大型车辆经常碾压等动态环境中, 剪切层位承载能力急剧降低, 产生开裂、层间滑移或者应力集中等损伤。软土或者松散地层中因土体变形自身不确定因素的影响, 初始阶段材料应力适配还可以保持, 只是随土体固结、含水率而改变, 结构位移的调整、内部拉伸状态随着时间的推移也逐步改变, 造成局部区域的早期疲劳破坏^[2]。而结构设计

中忽略了材料在这些复杂工况下的性能持续衰减，往往形成“前期坚实，后期无效”的隐性风险模式。尽管一些新材料通过强化编织密度和改性聚合物配比来提高其理论强度，但是它们和实际工程环境之间仍然有明显的性能差距。

2.3 与天然土体的界面黏结性能差，影响整体加固效果

土工合成材料应用于公路路基的一个核心功能就是与天然土体构成一个稳定的力学协同体系，从而加强整体结构对承载及变形的控制。但在许多工程实践过程中，新型材料尽管在自身强度、延展性能等方面取得了突破性进展，但与周边土壤之间界面黏结力普遍较低，特别是在非均质土层、高水位地区或者细粒土壤等情况下，由于土与材料界面摩擦力的不足，结构失稳的风险明显增大。一些材料表面处理虽然采取了粗糙化和编织纹理以期增大接触摩擦系数，但是仍然难以在天然土体长时间潮湿或者剪切应力高度集中时保持牢固状态。界面失效既影响材料自身加固功能，又易诱导裂缝扩展和渗水路径变化等二次结构病害。特别是边坡防护、涵洞基础和其他结构，界面黏结不充分更容易引起局部滑移和塌陷，严重时会影响工程的整体稳定。

2.4 应用区域适应性差，难以应对高原、湿陷性黄土等特殊地质条件

尽管当前许多新型土工合成材料在设计阶段已考虑到一定的环境适应能力，但在面对地质条件特殊、气候极端的区域，材料适应性差的问题仍屡见不鲜。在青藏高原这样高寒缺氧的地区，昼夜温差的急剧变化不仅使材料经常发生热胀冷缩，而且使材料内部的应力一再发生调节，长期服役产生疲劳裂纹的可能性大大增加。但湿陷性黄土地区由于遇水后地基土体结构强度显著降低，叠加材料不能有效地适应土体体积的剧烈变化，易引起整体结构坍塌或者大范围沉降。另外，在如红黏土、高膨胀土、盐渍土等特定地质问题中，不同的离子浓度、pH值或有机物含量都可能对材料的物理和化学稳定性产生影响，有些物料甚至几个月就会发生膨胀、溶胀或者化学分解等^[3]。更为关键的是，对于这些地区还没有成熟的选材标准及适应性评估机制，在工程设计过程中多以经验选材为主，缺少系统化的数据支撑使得其一经投入使用又会产生性能问题和昂贵的维修代价，甚至会影响到交通通行安全和工程的长远运行。

3 新型土工合成材料在公路路基加固中的性能提升策略

3.1 开发高耐候性复合材料，提高抗紫外线与抗老化性能

近年来，由于公路基础设施长期服役性能要求越来越高，强紫外辐射与高温湿交替气候环境中传统土工合成材料老化失效现象越来越明显。在高海拔地区，有些材料在不到两年的时间里就出现了明显的脆裂和强度下降，这大大限制了它们在工程中的使用寿命。基于这一背景，研发高耐候性复合材料就成了提高路基整体加固效果的重要战略之一。利用聚合物改性技术，在聚酯、聚丙烯等基础材料中加入紫外线吸收剂、抗氧化剂等功能性助剂，可以在分子层面上增强其对光氧化反应的抵抗能力。尤其在热氧条件下，以调节分子链段结晶度和结构稳定性来有效地推迟材料降解进程。另外，近年来一些研究小组已经在土工织物表面处理中采用氟碳涂层和热压复合技术，显著增强了织物抵抗紫外线和臭氧腐蚀的能力。相比较而言，这种处理方法既可以形成一层致密且稳定的保护膜，又可以保持良好的力学性能，从而使得长期加载过程中性能衰减曲线变得较为平坦。值得关注的是，材料耐候性能并不只取决于某一单一因素，还与微观结构、添加剂分布均匀性和界面相容性多重因素息息相关。所以，在高性能复合材料的设计过程中要协同配比和工艺优化各种功能成分，以形成具有抗热老化、耐湿膨胀和耐光照降解多重特性的复合材料体系。与此同时，建立相关室外暴露测试和加速老化模拟评价体系是极其有必要的，这样才能真实地反映出各种复杂环境下的材料服役行为，为材料研究和开发提供可量化性能评估依据。

3.2 引入纳米增强技术与多向编织结构，提升其拉伸与剪切强度

公路路基不仅受到竖向荷载的作用，还受到从车辆荷载、土体侧向滑移以及其他复杂力学作用的影响，从而对加固材料拉伸与剪切性能有很高的要求。传统的单向编织结构因纤维排列取向单一，在面临多轴荷载时往往受力不均匀，断裂面较为集中，造成整体增强效果有限。为打破这一瓶颈，目前的研究已逐步结合纳米增强技术和多向编织结构来获取更好的力学响应特性。在纳米增强技术方面，碳纳米管、石墨烯氧化物和纳米硅颗粒等多种材料在聚合物基体中得到了广泛的应用，目的是为了增强界面的附着力和内部结构的致密性。纳米填料因其巨大的比表面积和界面

活性,可在微观尺度下形成多点锚固机制进而强化纤维网络整体协同作用。这种增强机制区别于传统填料以“填充”来提高性能的方式,更多的是依靠界面能和微观力传导路径构建来增强拉伸变形中材料所能抵抗的极限强度及应变能力。同时,多向编织技术不断进化,通过对纤维交叉角度和层间密度的调控,形成了一种类似于蜂巢状或者斜交网格结构的力学传递路径来有效地分散各个方向上受到的应力,从而避免了局部应力的集中^[4]。多向复合织物能适应实际工程复杂地形和非均质土体环境并保持高应变区域界面结合状态稳定,特别是有滑移潜势或者差异沉降路基区域。应该注意到纳米增强剂分散时稳定性的好坏直接影响到增强效果的好坏,所以需要从分散工艺优化、界面剂选择和纳米颗粒表面改性几个环节进行系统的研究。

3.3 改进材料表面结构设计,增强与土体的摩擦黏结性能

材料表面结构设计已经不限于传统的光滑的膜状或者单纯的编织结构,最近几年研究重点逐渐扩展到表面粗糙化和结构立体化。引入凹凸纹理,突起颗粒和双向拉伸孔网技术手段显著改善材料和土体的机械咬合,从而提高界面剪切强度。另外,有试验证明,微观尺度上分级毛细结构的构筑可以在填土压实时产生多重锁固作用,使得材料的表面与其周围的土粒结合紧密,从而产生近似“咬合—嵌固等”的复合界面。该多重耦合结构相对于传统单一摩擦机制在长期加载过程中显示了较好的抗滑移能力及抗剪性能。同时,材料的柔性和构型会影响摩擦黏结性能。以湿陷性黄土地区为例,柔性加强筋和土体之间的协同适应能力通常比刚性构件要好,而刚性构件容易由于应力集中而造成接触不均匀和早期破坏。一些先进材料在整体质量没有明显增加的情况下,通过使用交错纤维布置及局部加厚节点等方式达到受力均匀的目的,从而改善铺设适应性及提高现场施工效率。

3.4 针对不同地质环境研发定制化材料体系,提升区域适应性

我国地域辽阔,地质条件千差万别,既有东南沿海软土地基,又有西北高原多年冻土、盐渍土以及西南山区红黏土、岩溶地貌,不同地区对土工材料性能的技术要求迥异。标准化和单一配方材料体系往往不能满足实际项目中所有适应性需求,即使在某一地区也是无效的。所以,促进土工合成材料朝着定制化发展已经成为增强公路路基加固体系效果的重点途径。具体来说,软土广布的沿海地区要求材料具有优良的抗渗性和长期蠕变性能,才能抑制土的侧向流动和差

异沉降;但在盐渍土区域,物质的化学稳定性就成了优先选择,否则容易产生盐析、断裂乃至结构崩解等现象。为了解决这类问题,一些研究机构将耐盐离子腐蚀组分添加到聚合物基体上,与多层复合工艺相结合,研制了一类适合高盐环境下使用的抗老化型复合材料。另外,高原地区低温冻胀条件需要材料保持足够柔性和断裂延伸率低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,给材料低温韧性和抑制微裂扩展能力带来挑战。面向冻土环境研制的高弹性纤维复合材料常以特殊弹性聚合物为基体,辅以耐寒纤维网作为支撑结构,既保持高强度又具有强抗裂性及形变适应性。在山区,由于地质条件更加复杂,如频繁的降雨和陡峭的坡角,这对材料的排水性、抗滑性和快速铺设能力提出了全面的要求。在这种情况下,可以考虑把土工网格和排水通道整合在一起,采用一体成型工艺生产出具有排水导向作用的结构材料^[5]。定制化材料体系研究与开发不只是性能差异设计,还以工程地质环境为对象进行系统响应,需要与区域地质资料相结合、考虑到长期的气候数据、施工方法和成本控制等多个因素,我们构建了一个完整的“情景—性质—材料”匹配模型,以实现真正的区域匹配和应用的最优化。

4 结束语

新型土工合成材料在公路路基加固中的应用有着广阔的发展前景,但是也遇到了不少挑战。通过发展高耐候性复合材料,引入纳米增强技术与多向编织结构,完善材料的表面结构设计,根据不同的地质环境开发定制化的材料体系等策略,能够有效地增强其各项性能,进而为公路路基加固工作提供更可靠的技术支撑。未来,随着材料科学和工程技术的持续发展,相信新型土工合成材料将在公路建设项目中扮演更为关键的角色。

参考文献:

- [1] 焦文慧.新型带翼土工格室加筋路基工程特性研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2024.
- [2] 尤慧敏.论公路路基设计中的土工合成材料应用[J].产品可靠性报告,2024(04):104-105.
- [3] 毕聪.新型土工合成材料在沥青路面全生命周期中的应用[J].产业创新研究,2024(06):130-132.
- [4] 陈钊.PVA 高分子吸水土工合成材料的水分迁移效果及机理研究[D].深圳:深圳大学,2023.
- [5] 崔新壮,李骏,齐辉,等.新型智能土工合成材料 SE GB 在服役温度范围内含损伤演化的流变行为(英文)[J].Journal of Central South University,2022,29(04):1250-1261.