

Key technologies for performance characterization and engineering application of high-performance materials in geotechnical transportation engineering

Yu Li

Hubei Province Gaochuang Highway Engineering Consulting and Supervision Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

This paper studies key technologies for the characterization and engineering application of high-performance materials in geotechnical transportation engineering. Aiming at the limitations of conventional empirical design methods when applied to cement-modified recycled base, cement-stabilized aggregate base, all-weather fill, and ultra-high-performance concrete piles, a material evaluation framework integrating resilient modulus modeling, trafficability assessment, and wave-based integrity testing is proposed. The study discusses testing procedures, parameter interpretation, model correction, and field implementation paths. Results show that high-performance materials can improve bearing capacity, construction efficiency, and durability, while their nonlinear and heterogeneous behavior requires more refined design and verification methods.

Keywords

high-performance materials; resilient modulus; all-weather fill; UHPC pile; trafficability; geotechnical transportation engineering

高性能材料在交通岩土工程中的性能表征与应用关键技术

李宇

湖北省高创公路工程咨询监理有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

本文面向交通岩土工程中高性能材料推广应用需求,研究水泥改性再生基层、水泥稳定骨料基层、全天候填料及超高性能混凝土桩的性能表征与工程应用关键技术。针对传统经验设计方法难以准确描述新型材料非线性、非均质行为的问题,构建了“材料识别-试验评价-模型修正-现场验证-设计反馈”的技术体系。研究从回弹模量建模、湿态通行性评价、干燥行为分析及波动测试判读等方面展开,提出适用于工程设计与质量控制的指标体系。分析表明,高性能材料可显著提升路基承载、施工连续性和结构耐久性,但需同步完善试验方法、参数选取和现场验收标准。

关键词

高性能材料; 回弹模量; 全天候填料; UHPC桩; 通行性; 交通岩土工程

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着公路、铁路和城市交通基础设施进入高强度建设与长期养护并重阶段,传统路基填料、普通基层材料和常规混凝土构件在复杂荷载、湿热环境和快速施工要求下逐渐暴露出适应性不足的问题。为提高工程结构的韧性、耐久性和资源利用效率,将再生材料、化学稳定材料、颗粒型全天候填料和超高性能混凝土等材料引入交通岩土工程,已成为提升基础设施质量的重要方向。

现有研究表明,水泥改性再生基层和水泥稳定骨料基层能够改善路基及基层刚度,其中再生沥青路面材料的利用

有利于降低资源消耗;全天候填料通常来源于碎石加工过程中不满足传统骨料规格但仍具有工程利用潜力的颗粒材料,其湿态抗变形能力优于普通细粒土;UHPC H型桩具有高强度、高耐久性和可拼接等优势,可在一定条件下替代钢桩或普通混凝土桩。然而,材料性能提升并不意味着可直接套用传统设计与检测方法。水泥改性材料的回弹模量受围压、偏应力、含水率和水泥剂量共同影响;全天候填料的通行性与降雨、排水和压实状态密切相关;UHPC桩内部钢纤维、钢端板和拼接部位会改变波阻抗分布,进而影响低应变完整性测试和动力承载分析的判读。由此可见,新材料的工程应用必须建立在有效表征和可靠评价基础上。

1.2 研究内容与创新点

本文依据交通岩土工程的设计、施工与检测需求,围绕四类典型高性能材料开展综合分析。研究内容包括:第一,建立水泥改性再生基层和水泥稳定骨料基层的回弹模量评

【作者简介】李宇(1988-),男,中国湖北洪湖人,本科,工程师,从事基建工程技术应用及综合管理研究。

价思路,讨论应力相关模型及参数修正方法;第二,构建全天候填料的湿态通行性和干燥恢复评价框架,提出面向施工组织的指标解释方法;第三,分析UHPC H型桩在低应变波动测试中的波速、反射和频域响应特征,提出现场检测判读建议;第四,形成适用于工程选材和质量验收的多指标评价体系。

本文的创新主要体现在三个方面:一是在材料评价层面,将路面设计所需的回弹模量、施工过程所需的通行性和桩基检测所需的动力响应纳入同一技术框架,避免单一指标评价造成的工程误判;二是在模型应用层面,强调模型参数的工程可解释性,提出基于应力状态、湿度状态和结构非均质性的修正思路;三是在工程实现层面,提出从试验室参数到现场质量控制的闭环流程,为高性能材料由试验研究走向工程推广提供技术路径。

2 高性能材料性能评价总体技术体系

2.1 工程需求分析

交通岩土工程对材料的要求具有明显的阶段性和场景性。在设计阶段,设计人员关注材料在长期重复荷载下的弹性恢复能力和结构层整体刚度,回弹模量是机械-经验路面设计中的关键输入参数。在施工阶段,项目管理人员关注填料在降雨或高含水条件下能否支撑运输车辆和压实机械通行,通行性直接决定工期和施工成本。在运营阶段,养护与检测人员关注结构是否发生损伤、拼接是否可靠、波动测试结果能否准确反映构件完整性。因此,高性能材料评价不能只停留在抗压强度或室内单一指标,而应围绕“设计可用、施工可控、检测可判、运营可追溯”建立综合体系。

2.2 总体技术路线

本文提出的总体技术路线包括五个环节。第一是材料识别,对材料来源、颗粒组成、胶结机制、构件截面和施工工艺进行分类,明确其与传统材料的差异。第二是试验评价,分别采用循环三轴试验、土槽通行性试验、干燥试验和低应变动力测试获得关键数据。第三是模型修正,将试验数据转化为设计参数,如回弹模量模型参数、湿态承载折减系数、干燥恢复系数和波速修正系数。第四是现场验证,通过试验段、施工路段或桩基模型测试验证参数的适用性。第五是设计反馈,将评价结果反馈到结构设计、施工组织和检测验收中,形成闭环。

2.3 指标体系构建

为了使不同材料评价结果具有可比性,本文构建了由力学性能、环境适应性、施工效率、检测可解释性和经济性组成的多维指标体系。力学性能包括回弹模量、CBR、抗剪强度、波速和阻抗;环境适应性包括含水率敏感性、干燥速率、冻融或湿干循环稳定性;施工效率包括雨后恢复时间、车辆通过次数和可压实窗口;检测可解释性包括波形稳定性、反射峰识别度和参数离散性;经济性包括材料获取成本、运输成本、养护成本和使用寿命收益。该体系有利于避免仅

凭强度指标选择材料,也可为不同工程场景下的材料组合优化提供依据。

3 关键技术研究是实现

3.1 水泥改性材料回弹模量建模技术

回弹模量是描述材料在重复荷载作用下可恢复变形能力的重要参数。对于水泥改性再生基层,材料内部既存在颗粒嵌挤效应,又存在胶结结构,其回弹模量通常随体积应力增加而提高,但在较高剪应力或微裂缝发展阶段可能出现软化。传统模型可采用以体积应力 θ 和八面体剪应力 τ_{oct} 为变量的形式: $Mr=k_1Pa(\theta/Pa)^{k_2}(\tau_{oct}/Pa+1)^{k_3}$,其中 Pa 为标准化应力, k_1 、 k_2 、 k_3 为回归参数。该模型能够反映应力相关性,但对于水泥改性材料仍需进一步解释参数物理意义。

在工程应用中, k_1 为材料基础刚度水平,受水泥剂量、养护龄期和压实度影响较大; k_2 代表围压敏感性,颗粒级配较好、嵌挤作用明显的材料通常具有较高 k_2 ; k_3 代表剪切敏感性,当材料胶结结构较脆或RAP掺量较高时,高剪应力可能导致 k_3 出现不稳定。为提高模型可靠性,建议在常规三参数模型基础上加入含水率修正项和龄期修正项,形成 $Mr'=Mr \cdot fw \cdot ft$,其中 fw 表示含水率偏离最佳含水率后的折减, ft 表示养护龄期导致的刚度增长。对施工现场而言,该修正方法比单纯取室内平均值更能反映材料实际状态。

3.2 全天候填料通行性与干燥评价技术

全天候填料的工程价值主要体现在湿态施工适应性。普通细粒土在降雨后含水率升高,轮载作用下易出现泵浆、车辙和剪切破坏,施工机械难以持续作业。全天候填料因颗粒较粗、排水通道较多,在受雨后能够较快排水并保持一定抗剪强度。

本文建议采用“初始承载能力-湿态保持率-干燥恢复率”三个指标描述全天候填料性能。初始承载能力反映材料压实后的基本强度;湿态保持率定义为降雨后承载指标与降雨前承载指标之比,可评价材料抗水损能力;干燥恢复率描述材料在自然或控制条件下由湿态恢复至可施工状态的速度。若某填料初始强度中等但湿态保持率高、干燥恢复快,则其在雨季施工中的综合价值可能高于干态强度较高但遇水迅速软化的材料。

3.3 UHPC H型桩动力响应判读技术

UHPC H型桩的高强度和耐久性使其适用于腐蚀环境、高承载要求和空间受限工程。与普通混凝土桩相比,UHPC材料弹性模量较高、内部含钢纤维、截面形状复杂,若设置钢端板或拼接板,桩身沿长度方向的波阻抗不再均匀。低应变测试中,冲击波沿桩身传播并在阻抗变化位置发生反射,若不区分材料界面反射和缺陷反射,可能将正常拼接位置误判为损伤。因此,UHPC桩检测应采用时间域与频率域结合的方法。在时间域,应根据实测或修正波速计算端部反射到达时间,并识别拼接部位的预期反射;在频率域,应分析主频峰值、频带能量和移动性曲线,判断反射是否来自截面突

变、材料界面或真实缺陷。建议在施工前建立标准波形库，将完整桩、拼接桩和模拟缺陷桩的波形进行对比，为现场检测提供判读依据。

4 工程应用效果分析

4.1 路基与基层结构优化效果

采用水泥改性再生基层或水泥稳定骨料基层后，结构层刚度提高，路面设计中可适当优化基层厚度或延长维修周期。但工程应用中应避免水泥剂量过高导致材料脆性增加，尤其在温缩、干缩和反复交通荷载共同作用下，过高刚度可能诱发反射裂缝。建议通过试验确定适宜水泥剂量区间，并将回弹模量、无侧限抗压强度和干缩指标联合控制。

4.2 雨季施工组织优化效果

全天候填料能够提高施工路段在降雨后的恢复速度。长期看，AWF 的价值不仅体现在材料本身成本，还体现在减少等待时间、降低机械闲置和提升施工连续性。

4.3 桩基检测与质量控制效果

UHPC 桩应用中，质量控制应前移到构件生产与拼接设计阶段。通过控制钢纤维分散、端板尺寸、拼接焊接质量和养护制度，可降低波动检测结果离散性。现场检测时，应将 UPV 测试、低应变测试和必要的高应变动力测试联合使用，形成多源证据链。对于重要工程，可在首批桩中设置试验桩，建立波速和标准反射特征，再推广到批量检测。

4.4 经济与环境效益分析

高性能材料的经济性应采用全寿命周期视角评估。CMRB 利用 RAP 材料，可减少废旧沥青混合料堆放和天然骨料开采；AWF 利用碎石加工副产品，可提高资源利用率；UHPC 桩虽然初始成本较高，但在腐蚀环境中可能通过延长寿命、减少维护和减小截面实现综合收益。若仅比较材料采购单价，容易低估高性能材料在工期、耐久性和环境方面的综合价值。

4.5 现场质量验收流程

为保证高性能材料应用效果，建议建立由进场检验、试验段验证、过程监测和完工复核组成的质量验收流程。进场检验阶段应核查材料性能。试验段验证阶段应使用方案数值验证可行性。过程监测阶段应对抽取试验数值与方案数值对比。完工复核阶段则应将室内参数与现场检测结果进行比对，判断材料是否满足设计假定。该流程能够使材料评价从一次性试验转变为全过程控制，减少新材料推广中的不确定性。

4.6 风险控制与标准化建议

高性能材料应用过程中应重视风险控制。对于水泥改性材料，应防止过量水泥造成早期收缩裂缝和后期脆性破坏；对于 AWF，应明确适用范围，避免将其直接用于对级配和洁净度要求极高的结构层；对于 UHPC 桩，应在设计阶段同步考虑拼接构造和检测方法，避免施工完成后无法解释测试结果。建议主管部门在试验方法、参数取值、现场验收和长期监测方面形成地方或行业指南，逐步建立材料数据库和典型工程案例库。

4.7 适用边界说明

需要指出的是，高性能材料并非在所有场景下均具有

绝对优势。若工程交通量较低、环境作用较弱且养护条件良好，传统材料可能已能满足设计要求；若运输距离过长或施工单位缺乏相应质量控制能力，新材料反而可能增加管理难度。因此，推广应用应以工程需求为前提，以试验数据为依据，以现场验证为约束，形成因地制宜的材料应用方案。

5 总结与展望

5.1 研究总结

本文围绕高性能材料在交通岩土工程中的性能表征与应用问题，构建了覆盖设计、施工和检测全过程的技术体系。研究认为，水泥改性再生基层和水泥稳定骨料基层的关键在于回弹模量模型的合理选取与现场状态修正；全天候填料的核心价值在于湿态通行性和干燥恢复能力；UHPC H 型桩的应用重点在于理解材料非均质性对波动测试的影响，并建立适配的检测判读方法。通过多指标评价，可将材料性能与工程需求有效匹配，提高新型材料推广的可靠性。

5.2 展望

未来研究可从以下方面进一步深化：一是开展长期现场监测，获得不同气候、荷载和施工条件下的材料性能衰减规律；二是将机器学习方法引入回弹模量和通行性预测，提高多因素条件下的参数估计精度；三是建立 UHPC 桩波形数据库和检测规范，减少现场判读主观性；四是完善材料全寿命周期评价体系，将碳排放、资源利用、工期收益和维护成本纳入决策模型。随着绿色交通和韧性基础设施建设需求不断提高，高性能材料将在交通岩土工程中发挥更重要作用。

参考文献

- [1] Skelton E H. Improving Engineering Design and Structural Performance through the Effective Characterization of High-Performance Materials in Geotechnical Transportation Engineering[D]. Tuscaloosa: The University of Alabama, 2022.
- [2] AASHTO. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice[S]. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [3] NCHRP. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures[R]. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- [4] USACE. Trafficability of Soils: Vehicle Cone Index and Mobility Index Evaluation Manual[S]. U.S. Army Corps of Engineers.
- [5] Graybeal B. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community[R]. Federal Highway Administration.
- [6] 王建国,李强.水泥稳定再生基层材料力学性能研究[J].公路交通科技,2021,38(6):25-31.
- [7] 刘明,张伟.道路工程再生材料应用及性能评价[J].交通建设与管理,2022(8):72-76.
- [8] 陈磊,赵宇.超高性能混凝土在桥梁基础工程中的应用进展[J].建筑材料学报,2023,26(4):405-414.