 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i6.10616

Study on the Influence of Engineering Cement-based Composite Materials on the Mechanical Properties and Crack Development of Roads and Bridges

Longxiang Gao

Shanxi Nuoxin Transportation Construction Engineering Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

With the continuous development of road and bridge engineering towards heavy load, durability, and full life cycle service, the shortcomings of traditional ordinary cement concrete in terms of insufficient tensile performance, obvious brittle failure, and limited crack control ability are becoming increasingly prominent, and it is difficult to fully meet the practical needs of improving structural performance in complex service environments. Based on this, the article focuses on the applicability of engineering cement-based composite materials in the field of roads and bridges, and systematically analyzes their impact on key performance indicators such as compressive strength, flexural strength, tensile strength, and deformation toughness through material composition design, specimen preparation, mechanical testing, and crack observation. The research results can provide theoretical basis and practical reference for the formulation optimization, performance evaluation, and engineering promotion of cement-based composite materials in road and bridge engineering.

Keywords

engineering cement-based composite materials; road and bridge engineering; mechanical properties; crack development

工程水泥基复合材料对路桥力学性能及裂缝发展规律影响研究

高龙祥

山西诺信交通建设工程有限公司，中国 · 山西 太原 030000

摘　要

随着路桥工程向重载化、耐久化与全寿命周期服役方向持续发展，传统普通水泥混凝土在抗拉性能不足、脆性破坏明显及裂缝控制能力有限等方面的短板日益突出，已难以完全满足复杂服役环境下结构性能提升的现实需求。基于此，文章围绕工程水泥基复合材料在路桥领域中的适用性展开研究，结合材料组成设计、试件制备、力学试验与裂缝观测等环节，系统分析其对抗压、抗折、抗拉及变形韧性等关键性能指标的影响规律。研究结果可为路桥工程中工程水泥基复合材料的配制优化、性能评价与工程推广提供理论依据与实践参考。

关键词

工程水泥基复合材料；路桥工程；力学性能；裂缝发展

1 引言

在路桥工程长期服役过程中，材料性能是决定结构承载稳定性、耐久寿命及养护成本水平的基础性因素。传统水泥混凝土虽具有原材料来源广、抗压强度高和施工工艺成熟等优势，但其天然脆性较强，抗拉与抗裂能力不足，在车辆重复荷载、温湿度循环、干缩徐变及环境侵蚀耦合作用下易产生微裂缝并逐步扩展，最终诱发刚度退化、钢筋锈蚀和局部剥蚀等病害。基于此，本文按照“试验方案设计—力学性能分析—工程应用评价”的逻辑展开研究，以期揭示工程水泥基复合材料对路桥力学行为与裂缝发展规律的调控机制，并提出面向工程实施的应用建议。

【作者简介】高龙祥（1988–），男，中国山西吕梁人，本科，高级工程师，从事道路桥梁研究。

2 工程水泥基复合材料试验方案

2.1 原材料组成与配合比设计

为保证工程水泥基复合材料兼具承载能力、变形协调能力与裂缝控制能力，试验中采用普通硅酸盐水泥作为主胶凝材料，并复合掺入粉煤灰、矿粉及少量硅灰，以提升浆体流动性、降低水化热峰值并改善硬化体微观孔隙结构；细集料选用级配连续的石英砂或机制细砂，以保证基体均匀性并降

低粗骨料对裂缝扩展路径的不利扰动；增强相则选用体积分数为 1.0% ~ 2.0% 的 PVA 纤维或玄武岩纤维，通过纤维长度、弹性模量和表面黏结特性的合理匹配形成多裂缝协同发展机制。配合比设计以低水胶比、高均匀性和适度纤维分散为原则，将水胶比控制在 0.26 ~ 0.32 之间，胶凝材料总量保持在较高水平，并通过聚羧酸高效减水剂调节和易性，使材料既具备浇筑成型所需的流动能力，又避免自由水过多引起泌水与收缩增大。对于路桥服役环境的针对性要求，试验进一步设置普通混凝土组与复合材料组进行对比，以便从强度、刚度、延性和裂缝响应等多个维度分析材料优化效果 [1]。

2.2 试件制备与养护条件控制

试件制备过程直接关系到试验结果的重复性与代表性，因此在搅拌工艺上采取“干料预混—浆体成型—纤维缓加分散”的分步控制方式，先将胶凝材料与细集料充分干拌，再加入按比例配制的水和减水剂形成均质浆体，最后分批缓慢投入纤维并延长低速搅拌时间，以降低纤维团聚和局部离析现象 [2]。成型阶段依据不同试验项目分别制备立方体抗压试件、棱柱体抗折试件及狗骨形或棱柱形抗拉试件，同时配置板式试件用于裂缝扩展观测。试件振实采用轻振与抹面结合的方式，避免过振造成纤维定向异常和浆体分层。脱模前严格控制实验室温湿条件，脱模后置于标准养护环境中养护 28 d，并对部分试件设置 7 d、56 d 龄期测试，以考察材料强度增长与裂缝演化的时间效应。为模拟路桥结构面临的实际工况，还可对部分板状试件施加干湿循环或温差作用，使裂缝观测更接近工程服役场景，从而提高研究结论的工程适用性 [3]。

2.3 力学性能测试方法设计

力学性能测试围绕抗压、抗折、抗拉及变形能力四个方面展开，以反映工程水泥基复合材料在路桥典型受力状态下的综合响应特征。抗压试验采用标准加载制度获取峰值强度、峰值应变及破坏形态，并与普通混凝土的脆性压碎模式进行对比；抗折试验采用三点弯曲或四点弯曲加载方式，重点测定首裂荷载、极限弯曲承载力及荷载—挠度曲线演化特征，以评价材料在受弯构件中的承载与耗能能力；抗拉性能测试则通过直接拉伸或劈裂对比试验分析材料起裂强度、极限拉应变及多缝开展能力，其中直接拉伸结果更能体现复合材料的延性本质；对于变形与韧性评价，则通过曲线积分方法计算韧性指数、断裂能和等效吸能指标，并结合弹性阶段、裂缝稳定扩展阶段和失稳破坏阶段的响应差异，对材料受力全过程进行分段解析。上述测试方法相互补充，能够较为全面地揭示材料在路桥构件中抵抗压缩、弯拉与裂缝扩展的性能优势 [4]。

2.4 裂缝观测指标与分析方法

裂缝观测是评价工程水泥基复合材料性能优劣的核心环节，试验中将裂缝宽度、裂缝数量、裂缝间距、首裂荷载对应位移及峰后裂缝扩展速率作为主要表征指标，并借助显微观测、数字图像相关法或表面标距观测方法，对裂缝从萌生、稳定扩展到贯通失稳的全过程进行跟踪记录。相比普通混凝土通常表现为单主裂缝快速扩展并导致承载突降，工程水泥基复合材料更强调“多缝化、细缝化和缓释化”的损伤发展特征，因此在分析方法上不仅关注最大裂缝宽度，还关注一定荷载水平下的平均裂缝分布均匀性及裂缝扩展的时空演化规律。为增强分析深度，可将裂缝发展划分为微裂纹萌生期、纤维桥联稳定扩展期和局部失稳集中期三个阶段，并结合荷载—位移曲线中的拐点识别材料内部损伤机制变化。通过宏观裂缝指标与微观界面特征的关联分析，可进一步说明矿物掺合料填充效应与纤维桥联效应在裂缝抑制中的协同作用机理 [5]。

3 工程水泥基复合材料对路桥力学性能的影响分析

3.1 抗压性能变化特征分析

从抗压性能看，工程水泥基复合材料在保持较高强度水平方面表现稳定，其 28 d 抗压强度通常可较普通基准混凝土提高 8% ~ 18%，主要原因在于矿物掺合料的二次水化作用改善了水泥石内部结构，降低了毛细孔隙率并提高了界面过渡区致密度。与此同时，纤维的引入虽然不会像粗骨料骨架那样显著提高压缩承载上限，但能够在峰值前后抑制局部裂缝迅速贯通，使材料内部应力重新分配能力增强，峰后残余承载特征更加明显。普通混凝土在受压破坏时常表现为棱角剥落和脆性压碎，而工程水泥基复合材料则多表现为表面裂纹增多但整体性保持较好，说明其在高压应力状态下具备一定的损伤容限。对于路桥工程而言，抗压强度并非唯一指标，峰值应变提升和峰后完整性改善同样重要，因为这意味着结构局部受压区在突发超载或应力集中条件下具有更高的安全储备。因此，工程水泥基复合材料在不牺牲抗压承载的前提下实现压缩破坏形态优化，是其适用于路桥高性能构件的重要基础。

3.2 抗折性能变化特征分析

抗折性能是衡量路桥材料适应受弯工况能力的关键指标，试验结果表明，工程水泥基复合材料在该方面的提升尤为显著，其抗折强度较普通混凝土一般可提高 20% ~ 40%，首裂后承载力下降幅度明显减缓，部分配比条件下甚至可出现一定程度的二次增载现象。这一变化表明，材料在初始裂缝出现后并未立即失去整体受力能力，而是依靠纤维跨缝传力和致密基体的协同作用维持受弯区应力传递，使裂缝由单点集中破坏转化为多裂缝分布型损伤。荷载—挠度曲线显示，普通混凝土在达到峰值后通常急剧下跌，而复合材料曲线则更平缓，延展段显著增长，反映出其在桥面板、铺装层及局部补强层中能够更有效地抵抗反复弯曲和冲击荷载。特别是在车辆荷载作用频繁且温度梯度显著的桥面系统中，较高的抗折承载与峰后变形能力可明显延缓

疲劳裂缝形成，提高层间协同受力的稳定性，因此工程水泥基复合材料在受弯主导的路桥应用场景中具有突出优势。

3.3 抗拉性能变化特征分析

抗拉性能是决定裂缝起裂与扩展行为的本质指标，也是普通混凝土最薄弱的性能环节。试验表明，工程水泥基复合材料的直接拉伸强度可较基准组提高 15% ~ 30%，更为重要的是极限拉应变水平成倍增长，部分优化配比可由普通混凝土约 0.01% 量级提高至 0.15% 甚至更高，体现出显著的应变硬化倾向和多缝拉伸特征。在受拉过程中，基体首先产生分散微裂纹，随后纤维在裂缝两侧形成桥联拉拔或断裂机制，延缓裂缝张开速率，使应力不再集中于单一裂缝截面，而是在更大范围内重新分配。由此，材料能够以“多条细裂缝共同发展”的方式代替“一条主裂缝迅速失稳”的传统路径，从根本上改变了路桥结构中裂缝不可控扩展的脆性模式。

3.4 变形能力与韧性提升规律分析

工程水泥基复合材料相较普通混凝土最具工程价值的改进之一，在于其变形能力与韧性指标的全面提升。试验中可观察到，材料在受力全过程中表现出更长的非线性发展阶段和更高的能量吸收能力，韧性指数、断裂能和峰后残余承载率均明显优于普通组。这种提升并非单纯依赖纤维数量增加，而是来源于基体强度、纤维刚度、界面黏结和孔隙结构之间的综合匹配：当基体过强时纤维容易被拉断，难以充分耗能；当界面过弱时纤维又会过早滑移，无法形成有效桥联。只有通过合理设计材料体系，才能使裂缝扩展过程中纤维拉拔耗能、界面摩阻耗能和基体微损伤耗能实现协调叠加。

4 工程水泥基复合材料在路桥工程中的应用评价

4.1 路桥工程适用部位分析

结合材料力学表现与裂缝控制特点，工程水泥基复合材料在路桥工程中的适用部位主要集中于对抗裂、耐久和变形协调要求较高的功能区域。其一，桥面铺装层和钢桥面系组合层是最典型应用场景，该部位长期承受车辆轮载冲击、温差变形及界面应力集中，传统铺装材料易产生网裂、脱空和剥落，而复合材料凭借较高受弯韧性和细缝化控制能力可有效改善铺装层服役表现；其二，梁端、伸缩缝附近及桥头搭板等结构过渡区常因刚度突变和反复荷载产生开裂病害，复合材料较强的拉伸延性和裂缝分散能力有利于吸收局部变形并减轻应力集中；其三，道路快速修补层、桥梁维修加固薄层及高耐久防护层等薄壁或薄层构造对材料黏结性、抗裂性和施工适应性要求较高，采用工程水泥基复合材料可提高修补层与原结构协同工作能力，减少二次开裂风险。

4.2 工程应用技术优势分析

从工程应用角度分析，工程水泥基复合材料的技术优势主要体现在性能综合化、裂缝可控化和服役耐久化三个层面。首先，该材料并非简单追求某单一强度指标，而是在较高抗压水平基础上同步提升抗折、抗拉、延性和抗冲击性能，能够更好适应路桥结构复杂受力状态；其次，其多缝细化裂缝模式显著降低单条主裂缝宽度，可将裂缝控制在较小尺度内，从而减少水分、氯离子和二氧化碳侵入通道，对抑制钢筋锈蚀和冻融劣化具有积极作用；再次，材料内部通过矿物掺合料与纤维增强的耦合，可改善收缩敏感性并延缓损伤扩展，使结构在全寿命周期内保持较高的刚度稳定性与使用安全性。

4.3 施工控制要点分析

虽然工程水泥基复合材料在性能上具有明显优势，但其工程应用效果仍高度依赖施工过程控制水平。第一，在拌和阶段应严格控制纤维投放顺序、搅拌时间和浆体流动度，避免出现纤维团聚、局部泌水或离析，必要时应通过现场试拌确定最佳减水剂掺量与投料节奏；第二，在浇筑成型阶段应根据结构部位尺寸和钢筋密集程度选择适宜的施工工艺，对薄层铺装和修补构造尤其要重视界面处理质量，采用凿毛、清洁、预湿和界面剂等措施提升新老材料黏结性能；第三，在养护阶段需加强早期保湿与温控管理，防止高胶凝材料体系因失水过快而产生塑性收缩裂缝，同时对桥面等暴露部位应采取覆盖、喷雾或养护膜等综合措施控制表层水分蒸发。

5 结论

本文围绕工程水泥基复合材料对路桥力学性能及裂缝发展规律的影响进行了系统研究。研究表明，采用高活性矿物掺合料与短切纤维协同增强的材料设计思路，能够在优化基体致密性的同时显著改善裂缝桥联能力，使材料在抗压性能稳定增长的基础上，进一步提升抗折承载、抗拉延性和峰后韧性水平。经过综合分析可知，该材料在桥面铺装、结构过渡区、薄层修补和耐久防护等部位具有较强适用性，但其推广应用仍需以合理配合比设计、纤维均匀分散、界面处理优化及早期养护控制为前提。未来可结合疲劳荷载、冻融循环及多场耦合作用开展进一步研究，以构建更加完善的工程评价指标体系，为路桥高性能材料的设计与应用提供更具针对性的技术支撑。

参考文献

[1] 王永俊,郑小刚,郑易涛.变轴力工程用水泥基复合材料RC组合柱抗震性能研究[J].建筑结构,2023,53(17):104-111.

[2] 余洁歆,朱艺婷,庄旭,等.以尾矿砂为骨料的绿色工程水泥基复合材料力学性能研究[J].硅酸盐通报,2025,44(9):3337-3346.

[3] 范淋,杨嬰,祁小龙,等.SMAF增强PP/PVA混杂纤维工程水泥基复合材料拉伸性能[J].硅酸盐通报,2025,44(3):811-820.

[4] 张勤,朱潇鹏,代欢欢,等.耐碱玻璃纤维ECC复合材料受压应力-应变关系[J].工程科学与技术,2022,54(5):82-92.

[5] 赵晓康,董侨,陈雪琴,等.考虑初始缺陷的水泥基复合材料细观开裂研究[J].中国公路学报,2020,33(10):230-239.