

路面基层材料强度特性对公路使用寿命的影响研究

肖兴旺

湖南省高速公路集团有限公司 湖南长沙 410008

DOI: 10.12238/ems.v7i8.14642

[摘要] 本文围绕路面基层材料强度特性及其对公路使用寿命的影响,提出了多项完善措施。首先,通过化学改性剂与纤维增强材料的应用,以及配合比优化,实现对基层抗压、抗剪和疲劳强度的整体提升;其次,强调在施工过程中严格控制含水率、碾压工艺和现场质量检测,以保证设计强度的实现;再次,完善排水系统与防水层设计,减少水分对基层的侵蚀和冻融损害;最后,构建基于物联网与大数据的科学化养护与监测管理体系,实现实时监控与预测性维修。上述措施的综合应用,有望显著延长公路基层结构的耐久性,降低全生命周期养护成本。

[关键词] 路面基层材料;强度特性;公路使用寿命

1 路面基层材料强度特性

1.1 常见基层材料及分类

路面基层材料主要包括天然级配碎石、石渣、砂砾桩和水泥稳定土等多种类型。天然级配碎石来源丰富,级配连续,具有良好的承载力和透水性;石渣则因其较高的钙质含量,强度稳定性优于普通碎石,但内摩擦角略低;砂砾桩在松软地基改良中常用,可将松散土层置换或加固,提高局部承载力;水泥稳定土则通过水泥水化产生胶结作用,使土体强度和刚度显著增强,但同时也带来一定的脆性。不同材料在施工工艺、养生条件和环境温度等方面对强度发展速度和最终强度值均有显著影响,应根据路面设计荷载、气候条件和施工条件进行合理选择与优化配置,以确保基层结构整体性能满足设计要求。

1.2 压缩强度特性

压缩强度是衡量基层材料抵抗垂直荷载变形和破坏的重要指标。常采用三轴压缩试验和单轴抗压试验测定其峰值强度和应力-应变关系。天然级配碎石和石渣在干燥状态下,其压缩模量通常较高,但在含水率升高后,抗压强度会有所下降;水泥稳定土压缩强度随龄期增长而显著提升,28d强度可达2~5MPa,且与水灰比密切相关。试验结果表明,基层材料的压缩变形模量E50或E100是衡量其初始刚度的关键参数,应结合路面结构层厚度和设计交通荷载,合理选取材料并控制施工压实度,以保证基层在设计寿命内具有足够的承载能力和变形抵抗性能。

1.3 抗剪强度特性

抗剪强度决定了基层在横向和剪切荷载作用下的抗滑移

和抗内摩擦性能。直剪试验和三轴剪切试验是常用方法,可得到材料的内摩擦角 ϕ 和黏聚力 c 两项参数。未稳定化的级配碎石和石渣主要依赖颗粒间的摩擦力,其 ϕ 值一般在 35° ~ 45° 之间, c 值可略取为零;水泥稳定土则兼具黏聚力和摩擦力, c 值可达50~200kPa, ϕ 值约 20° ~ 30° 。含水率对抗剪强度影响较大,超塑限状态下材料强度急剧下降。因此,在施工和设计中需严格控制基层含水率及压实度,通过合理的配合比设计和施工现场质量控制,确保基层材料在复杂应力状态下保持足够的抗剪性能,防止路面产生过大的横向变形或剪切失稳。

1.4 疲劳强度与耐久性能

疲劳强度是评价基层材料在重复交通荷载作用下长期耐久性的重要指标。不同材料的疲劳特性差异显著:天然碎石和石渣基层在高应力循环作用下,随着级配间隙变形和颗粒破碎,初期刚度逐渐下降,但失效循环次数较多;水泥和石灰稳定基层则表现出明显的疲劳极限,当应力水平低于其疲劳极限时,可承受极大量循环荷载;高于极限时,会因微裂缝累积、粘结界面劣化而迅速失效。试验中常采用弯拉疲劳试验和四点弯曲疲劳试验来评估材料疲劳寿命。为提高道路使用寿命,应结合路面结构设计确定基层厚度、选取合适的稳定材料配合比,并在养护环节严格执行初期温度和湿度控制,以最大程度减缓疲劳损伤累积,延长路面整体耐久性。

2 路面基层材料强度特性对公路使用寿命的影响

2.1 压缩强度特性对路面使用寿命的影响

路面基层材料的静态压缩强度是其抵抗来自车辆荷载的最基本性能指标。当基层的抗压强度不足时,在重复荷载作

用下易发生塑性沉陷和永久变形, 导致上部路面出现波浪形坑槽 (rutting) 和不均匀沉降, 进而缩短道路使用寿命。天然级配碎石和石渣基层在合理压实状态下, 通常具有较高的压缩模量和峰值强度, 可在早期就支撑上层结构并分散荷载; 而水泥或石灰稳定土虽然强度随着龄期显著增长, 但施工初期若养护不当或配合比设计不合理, 易产生龟裂并影响与面层的结合, 进而加速路面结构劣化。大量现场和实验研究表明, 当基层静态压缩强度不足以满足设计交通等级时, 道路出现塑性沉陷的循环次数会显著减少。例如, 某级配碎石基层在最大压实度下内聚力和抗压模量每降低 10%, 路面发生 20mm 沉陷的荷载循环次数就可能减少 30% 以上。因此, 在基层材料选用与施工控制中, 应通过规范的三轴或单轴抗压试验, 确定材料的 E50 压缩模量和峰值强度, 并严格控制施工压实度、含水率和养护工艺, 以确保基层在设计荷载作用寿命期内维持足够的承载能力和变形抵抗性能, 从而延长公路的整体使用寿命。

2.2 抗剪强度与疲劳强度对路面耐久性的影响

抗剪强度反映了基层材料抵抗剪切破坏和维持层间稳定的能力, 是防止路面横向扩展、滑塌和裂缝发展的关键因素。未经过稳定化处理的级配碎石与石渣, 主要依赖颗粒间摩擦, 其内摩擦角一般在 $35^{\circ} - 45^{\circ}$; 在湿润或高含水率状态下, 摩擦角会降低, 从而降低抗剪强度, 增加路基侧向位移风险。相比之下, 水泥或石灰稳定基层具备黏聚力, 其直剪试验获得的黏聚力 c 值可达 100 - 200kPa, 可有效抑制剪切裂缝的萌生与扩展, 但同时也带来较低的抗拉伸疲劳性能。疲劳强度则关系到材料在数万至数十万次重复荷载作用下微裂缝的累积与扩展速率。四点弯曲疲劳试验和三点弯拉试验常用于评估稳定化基层的疲劳寿命, 结果表明, 当跨应力水平低于材料疲劳极限时, 裂缝扩展速率显著下降, 可实现“无限寿命”状态; 但一旦日常交通荷载超过极限, 疲劳裂缝将以稳定的指数速率累积, 最终导致基层结构破坏并传递到面层。实地监测也发现, 基层抗剪强度不足或疲劳性能欠佳的路段, 往往出现贯通性裂缝, 进而引发面层坑槽、水损加剧及加速基层剥离。因此, 为增强道路耐久性, 设计与施工中应重视抗剪与疲劳强度指标: 通过合理配比提升材料内摩擦角和黏聚力, 优化压实工艺、严格控制含水率, 并在高等级公路或重载路线中优先采用高性能稳定剂 (如改性水泥或聚合物稳定剂), 以确保基层在长期荷载作用下保持足够的抗剪抗疲劳

能力, 从而显著延长公路使用寿命。

2.3 疲劳强度对循环荷载耐久性的影响

疲劳强度是评价路面基层在反复交通荷载下微裂缝萌生与扩展规律的关键指标。随着车辆荷载反复作用, 基层材料内部会累积微观损伤, 表现为胶结界面微裂、颗粒间摩擦面崩落以及孔隙结构重新排列。当应力水平低于材料疲劳极限 (fatigue limit) 时, 裂缝扩展速率趋缓, 基层可维持较长使用寿命; 一旦超过极限, 应力 - 循环次数 (S - N) 曲线迅速下移, 裂缝以指数速率增长, 并在相对较少的循环次数内出现贯通性破坏。实验室常用四点弯疲劳试验、三点弯疲劳试验和重复三轴试验来获取 S - N 曲线及疲劳参数, 如疲劳寿命指数和损伤演化系数, 这些参数能够直接用于路面结构设计和维修决策。

现场监测则借助 FWD (落锤式圆板弯沉仪) 和振动监测等方法评估基层刚度衰减速率, 以推算剩余疲劳寿命。当基层材料的疲劳强度不足时, 即便初期强度满足静载要求, 长期循环荷载也会导致基层与面层界面脱粘、纵横裂缝交叉发展, 最终形成龟裂网状结构并加剧水损渗透, 加速基层强度退化。针对疲劳破坏, 可通过以下手段加以缓解: 一是优化材料配合比, 添加聚合物改性剂或纤维增强剂, 提高黏结性能与抗裂性能; 二是合理设计基层厚度和级配, 以降低截面应力水平; 三是在施工过程中严格控制压实度和含水率, 确保材料力学性能达到设计值; 四是使用抑裂层或抗拉性能优异的增强材料, 如土工格栅, 以分散疲劳应力集中。通过这些综合措施, 可显著提高基层的循环荷载耐久性, 延长道路服役期。

2.4 耐久性能与养护管理对使用寿命的影响

基层材料的耐久性能涵盖抗冻融、抗化学侵蚀和抗水损能力, 它们直接决定路面在自然环境和运营状态下的寿命。抗冻融性能不足的基层, 在低温融化循环中会因毛细孔中水分结冰膨胀导致微裂缝扩展; 融水渗透后, 反复冻结会加剧骨料剥落和胶结界面破坏。抗化学侵蚀性则关系到道路所处环境中盐分、油品或酸碱性物质对基层材料的损害, 长期侵蚀会降低粘结剂 (如水泥、石灰) 胶结能力和颗粒间摩擦力。良好的排水设计和边坡防护可有效减少地下水和地表水对基层的渗透, 显著提升耐久性。

此外, 应建立路面健康监测体系, 综合运用路面粗糙度 (IRI)、动态模量测试、超声波检测等手段, 实时掌握基层

性能变化。基于大数据和预测模型,可精准确定最优维修时机,避免过早或过迟养护造成资源浪费或病害扩展。通过优化材料耐久性能与科学化养护管理的有机结合,才能最大化延长公路使用寿命,降低全生命周期成本。

3 完善措施

3.1 材料配比与改性优化

为提升基层材料的强度和耐久性,应在常规级配碎石或稳定土中引入化学改性剂与纤维增强材料。聚合物乳液、环氧树脂、硅烷偶联剂等改性剂可以显著提高骨料间黏结性能,使复合基层在干湿循环和冻融循环中保持较高的抗剪强度和疲劳性能;掺入合成纤维(如聚丙烯纤维、聚酯纤维)可抑制微裂缝扩展,增强抗拉与抗疲劳能力。同时,应针对不同路况荷载等级和环境条件,通过三轴试验、弯拉疲劳试验等手段优化材料配合比,确保改性剂掺量、纤维长度与掺量比例在性能增益与经济成本之间取得平衡。材料实验室配比优化完成后,还需进行现场试验路段铺设,通过原位沉降、FWD 动测和表面裂缝监测等评价,及时调整配比与施工工艺,实现材料性能的最大化利用与道路寿命的有效延长。

3.2 施工工艺与质量控制强化

基层施工质量对最终结构性能起决定性作用。首先应严格控制材料含水率,采用智能水分测定仪与现场核定养护曲线,确保土—水泥或土—石灰混合物在最佳含水范围内进行碾压,以获得理想的最大干密度与初期强度。其次,碾压设备选型与碾压工艺应科学匹配:初压宜用重型压路机松动铺层,末压使用振动压路机结合静压,以实现均匀密实;碾压幅数和速度需依据实测的压实度实时调整。施工期间应配备核验孔、核心取样和原位密度测试设备,保证层间粘结与压实度达到规范要求;同时对重要路段设立专门试验段,针对不同施工参数进行对比试验,从而制定最优施工工艺标准,切实提升基层强度特性和使用寿命。

3.3 排水系统与防水措施完善

合理的排水设计是确保基层耐久性的重要保障。路面横向、纵向排水系统须配合纵横坡度,快速将降水和渗水导出路基,防止长时间积水产生的含水率升高与冻融损害。应设置集水井、侧沟、纵向排水带及透水性好的碎石排水层,并在基层底下铺设无纤维土工布或透水管,形成“先排水再承载”的结构体系。对于高地下水位区域,还应采用截水排

水墙或土工复合排水板,降低孔隙水压力。防水层方面,可在基层与面层间铺设自粘沥青膜或聚乙烯高分子防水膜,减少水分侵蚀和高温下松散基层产生的界面分层,从而有效延长公路长效使用寿命。

3.4 科学养护与监测管理体系构建

在基层施工完成后,应建立全寿命周期的养护管理体系,结合物联网技术和大数据分析,实现实时监测与预测性养护。通过嵌入式传感器监测基层含水率、温度、动应力与沉降,并将数据上传至云平台,运用机器学习模型预测基层强度衰减趋势与潜在病害位置。针对预测结果,可制定分级养护策略:对轻微裂缝及时封闭涂层,对中度病害实施微表处或热再生处理,对严重损坏路段进行局部翻新或重构。同时,通过无人机航拍与高清摄像头定期巡检,结合 AI 图像识别技术快速定位坑槽和裂缝,并自动生成维修工单,提高养护效率与精准度。科学化、精细化的养护管理,不仅能延缓基层结构劣化速度,还能大幅降低全生命周期养护成本,为公路长久安全运营提供坚实保障。

4 结束语

路面基层是公路结构的根基,其强度与耐久性能直接决定了道路的承载能力与使用寿命。通过材料改性、施工质量控制、排水防护及智能化养护管理的系统化完善,不仅能够提升基层的力学性能,还能实现对病害的早期预警与精准维修。未来,应继续推进新型改性材料和先进监测技术的研发与应用,以进一步提高路面基层的性能稳定性,为公路安全、经济、可持续运营提供坚实保障。

[参考文献]

- [1]张海平.公路路面工程基层施工存在的产品质量问题及对策[J].中国品牌与防伪,2025(04):128-130.
- [2]李铭.公路路面基层水稳碎石强度和模量取值研究[J].交通世界,2025(09):79-81.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2025.09.041.
- [3]况菱芳.城市道路装配式路面基层设计及工程应用[J].交通世界,2025(08):45-47.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2025.08.017.
- [4]叶勇.公路施工中防水路面基层的施工技术[J].中华建设,2025(02):143-144.