

The Influence and optimization of cement-stabilized Base on the Bearing Capacity of Highway Subgrade

Liping Bai

Guoji Construction Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

This paper focuses on the influence mechanism and optimization strategies of cement-stabilized base on the bearing capacity of highway subgrade. Through theoretical analysis and experimental research verification, the influence laws of the characteristics of cement-stabilized base materials and construction techniques on the bearing capacity of the subgrade were systematically explored. Studies show that factors such as cement dosage, aggregate gradation, and compaction degree significantly affect the strength and stability of the base layer, thereby altering the bearing capacity of the roadbed. Reasonable increase of cement dosage and optimization of aggregate gradation can enhance the integrity of the base layer and improve the bearing capacity of the roadbed. For every 1% increase in compaction degree, the springback modulus of the base layer increases by 3% to 5%, and the bearing capacity of the roadbed is significantly improved. Based on the research results, the key points of material ratio optimization, construction process improvement and quality control are proposed to provide technical support for enhancing the bearing capacity of highway subgrades and prolonging the service life of roads. The research results have important practical significance for ensuring the quality of highway engineering and reducing the later maintenance cost.

Keywords

cement stabilized base layer; Highway subgrade; Carrying capacity; Material ratio; Construction technology

水泥稳定基层对公路路基承载力的影响与优化

白丽萍

国基建设集团有限公司，中国·山西太原 030000

摘要

本文聚焦水泥稳定基层对公路路基承载力的影响机制与优化策略。通过理论分析及试验研究验证，系统探讨水泥稳定基层材料特性、施工工艺对路基承载力的影响规律。研究表明，水泥剂量、集料级配、压实度等因素显著影响基层强度与稳定性，进而改变路基承载性能。合理提高水泥剂量、优化集料级配可增强基层整体性，提升路基承载力；压实度每提升1%，基层回弹模量增加3%~5%，路基承载能力显著改善。基于研究结果，提出材料配比优化、施工工艺改进及质量控制要点，为提升公路路基承载性能、延长道路使用寿命提供技术支持。研究成果对保障公路工程质量、降低后期维护成本具有重要实践意义。

关键词

水泥稳定基层；公路路基；承载力；材料配比；施工工艺

1 引言

公路路基作为路面结构的基础，道路的使用寿命以及行车安全由其承载能力直接决定。水泥稳定基层依靠高强度、良好板体性以及出色水稳性等长处，成为公路基层惯用的结构样式。在实际的工程实施中，材料配比不恰当、施工工艺有欠缺，导致基层开裂、路基沉陷等病害屡屡出现，极大降低了道路的承载能力。本文通过理论分析与试验研究，揭示水泥稳定基层影响路基承载力的关键因素，并提出针对性优化措施，为公路工程设计与施工提供参考。

2 水泥稳定基层影响路基承载力的理论分析

2.1 力学作用机制

水泥稳定基层以胶结、填充与骨架嵌挤作用达成，生成带有较高刚度及强度的板体结构形态，在车辆荷载发挥作用之际，基层把集中荷载往路基进行扩散，降低路基顶面压应力数值，遵照弹性层状体系理论内容，有效减小路基竖向变形，可借助提高基层模量，一旦水泥稳定基层回弹模量从 1500MPa 升至 2500MPa 时，可实现路基顶面弯沉值降低 20%~30%，承载能力呈现显著增强态势，良好水稳性的基层可减轻路基因水分迁移引起的强度衰减，从侧面提升路基的承载性能 [1]。

【作者简介】白丽萍（1994-），女，中国山西太原人，本科，工程师，从事公路、水利研究。

2.2 关键影响因素

2.2.1 材料组成

水泥剂量直接关联着基层强度，剂量不足引起胶结不充分，强度上扬缓慢；剂量超出合理范围，收缩开裂风险增大，集料的级配情况对骨架结构的形成起到关键决定性作用，采用连续级配集料能增强密实度，然而却容易造成离析；间断级配的集料可强化嵌挤能力，然而要控制好细集料含量，防止空隙率过度增大。

2.2.2 施工工艺

压实度作为核心指标，深刻影响基层质量，若压实不足，基层孔隙率会超标，造成承载能力下滑；过度的压实也许会破坏掉集料结构，养生条件同样具有关键意义，实行保湿养生可促进水泥的水化，养生期若不足，强度便无法充分拓展提升。

2.2.3 环境因素

水泥的水化进程及其材料性能受温度和湿度变化左右，低温环境里，水泥水化的进度十分缓慢，强度增长显滞后；基层材料受长期浸水影响而软化，引起模量与强度降低，弱化对路基的支撑效能发挥。

3 水泥稳定基层对路基承载力影响的试验研究

3.1 室内试验设计

3.1.1 材料配比试验

为探寻水泥剂量对水泥稳定基层性能的影响机制，试验严格按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51)，精心设计5组不同水泥剂量的水泥稳定碎石混合料，试验把粒径0-31.5mm的石灰岩碎石选作集料，其压碎值测得为18%，针片状含量控制范围为12%以内，满足二级及以上公路基层用料要求，细集料采用机制砂，其含泥量是2.1%，各项指标皆契合规范要求^[2]。

5组试验各自的水泥剂量设定为3%、4%、5%、6%、7%，以《公路路面基层施工技术细则》(JTG/TF20)推荐的骨架密实型级配(表1)作为集料级配，采用重型击实试验确定每组混合料的最佳含水率及最大干密度，试验得出的结果表明，伴随水泥剂量的递增，最佳含水率显现出上升的走势，最大干密度先出现增大，继而出现减小，当水泥添加剂量为5%之际，混合料实现了2.35g/cm³的最大干密度，其处于最佳状态时含水率为5.8%。

开展针对不同配比混合料的无侧限抗压强度测试，依照最佳含水率与最大干密度制备尺寸达Φ150mm×150mm的圆柱体试件，每组产出6个平行的试件，试件成型工序结束后，处于温度为20±2℃、湿度≥95%的标准养护环境，分别进行7天和28天养护，检测此试件无侧限抗压强度。

3.1.2 承载板试验

为模拟实际工程期间水泥稳定基层与路基协同作用的受力状态，采用承载板试验分析不同压实度下基层对路基承载力产生的影响，试验把粉质黏土选作路基模拟材料，该土液限是32%，呈现18%的塑限，其天然含水率为16个百分点，把路基材料分层次填筑进尺寸为1.5m×1.5m×1.2m

的钢制试验槽里，每层厚度控制成20cm，依靠电动击实仪开展压实，让其压实度实现93%，对一般公路路基压实状态进行模拟。

表1 水泥稳定碎石集料级配

筛孔尺寸(mm)	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
通过质量百分率(%)	100	88	68	47	32	20	5

尺寸为30cm×30cm×15cm的水泥稳定基层试件，采用3种不同压实度(95%、97%、99%)加以制备，于压实操作开展期间，以小型振动压实机开展分层压实工序，每层的压实厚度达5cm，使压实结果均匀一致，把制备完成的基层试件放置到路基模拟材料表面，借助直径为30cm的圆形刚性承载板实施加载试验。

加载设备采用液压式路面材料强度试验仪，采用一级一级加载方式，采用0.1MPa、0.2MPa、0.3MPa、0.4MPa、0.5MPa作为荷载分级，每一级荷载施加结束后，实现1分钟的稳定，记录承载板中心那个位置的沉降值，绘就荷载-沉降的对应曲线，按照弹性力学所涉及的公式，算出基层于不同压实度时的回弹模量与路基顶面弯沉值。

3.2 试验结果分析

3.2.1 材料性能影响

无侧限抗压强度试验的结果证实，伴随水泥剂量的增长，7天、28天的混合料无侧限抗压强度均呈现出上升趋势，要是水泥剂量为3%的时候，混合料历经7天，强度仅为2.1MPa，28天对应的强度是3.5MPa；若水泥剂量提升到5%，7天强度上扬至3.8MPa，28天强度攀升至6.2MPa；继续增添水泥剂量至7%，28天强度攀升至7.8MPa，只是强度增长速率明显降低。由收缩试验得出，只要水泥剂量超过6%，混合料干缩系数从0.045%/℃上升到0.068%/℃，开裂风险急剧升高，结合强度与收缩特性，当水泥剂量是5%，混合料综合性能达到最佳水平，能达到强度的既定要求，还能切实把控收缩开裂隐患。

3.2.2 压实度影响

由表2承载板试验数据可见，压实度显著影响着基层回弹模量与路基顶面弯沉值，若基层压实度从95%提升至97%，基层回弹模量由1600MPa跃升至1900MPa，路基顶面弯沉值自45；进一步把压实度提升至99%，基层回弹模量涨至2200MPa，路基顶面弯沉值下探至31，统计分析说明，压实度每上扬1%，基层回弹模量平均实现4%的增长，路基顶面弯沉值出现约8%的下降，这体现出提高压实度可显著增强基层承载能力，减少路基顶面产生的变形，以此提高整个路面结构的承载能力。

3.2.3 水稳性能试验

为鉴定水泥稳定基层的抗水损害能力，选定水泥剂量是5%的混合料试件做浸水试验，把养护达28天的试件浸入水里48小时，检测试件浸水之后的无侧限抗压强度，然后计算强度保留的占比，实验结果呈现，48小时浸水时间段结束后，试件无侧限抗压强度检测值为5.3MPa，强度保

留率达 85 个百分点，远超过水泥剂量为 3% 混合料 72% 的强度保留率数值，这体现合理的水泥剂量可切实改良基层材料的水稳性能，减轻水分侵蚀路基所造成的强度衰减现象，在一定程度上增强路基长期承载能力^[1]。

表 2 不同压实度下基层模量与路基弯沉试验结果

压实度	基层回弹模量 (MPa)	路基顶面弯沉 (0.01mm)
95%	1600	45
97%	1900	36
99%	2200	31

4 水泥稳定基层优化策略

4.1 材料配比优化

4.1.1 水泥剂量精细化调控

水泥剂量是左右水泥稳定基层强度与耐久性的核心要素，需按照道路等级、交通荷载及环境状况开展精确化设计，就二级公路等中轻型交通道路而言，水泥剂量宜把控在 4%~5% 的区间，此剂量范围保证基层 7 天无侧限抗压强度达到 3~4MPa 的水平，符合相关规范标准，还可杜绝因水泥过量添加而产生的收缩开裂风险，就高速公路、重载交通道路等特殊需求的场景而言，推荐把水泥剂量增加到 5%~6%，借助添加 0.1%~0.3% 的聚丙烯纤维，可让干缩裂缝宽度降低 60% 以上，显著提高基层抗裂的水平。

4.1.2 集料级配优化设计

采用骨架密实型级配以提升基层承载能力，调节 4.75mm 以下细集料含量至 28%~32% 区间，可保证集料建立起嵌挤结构，也能防止因细料过度存在引发的空隙率超标问题，以石灰岩碎石当作例子，推荐采用间断级配方案设计，以降低中间粒径 (9.5~19mm) 颗粒的含量达成目的，增大粗集料 (19~31.5mm) 与细集料 (0~4.75mm) 的占比数值，塑造“粗集料嵌挤相连、细集料填充空隙”的密实体系，在实际的工程项目里，将 5%~10% 机制砂掺加进去替代天然砂，可改善混合料工作性。

4.2 施工工艺改进

4.2.1 压实工艺标准化控制

推行包含“初压-复压-终压”三阶段的标准化压实工艺，于初压阶段，以 12~15t 轻型压路机静压 1~2 遍，把速度把控在 1.5~2km/h，主要用途是稳固混合料，杜绝混合料出现推移现象，复压阶段让 20~22t 重型振动压路机振压 3~4 遍，将振动频率控制在 30~35Hz，振幅于 0.8~1.2mm 波动，以每小时 2~3 千米的速度操作。采用高频低幅的振动方式，令集料彼此嵌挤而密实，每一遍操作后压实度增长 2%~3%，终压时用超过 25t 的胶轮压路机静压 1~2 遍，去除轮迹以强化表面的密实性，因胶轮压路机的揉搓作用，基层表面压实度可提高 1%~2%，可切实遏制表面产生松散^[4]。

4.2.2 养生与防水一体化技术

搭建以“覆盖保湿、封闭交通、防水处理”为核心的养生防护体系，压实完毕后的 2 小时内，覆盖透水土工布处理，每日实施 3 至 4 次洒水操作，维持表面始终处于湿润情

形，养生期起码要有 7 天，若期间温度低于 5℃，应覆盖棉被以保温，防止水泥水化受抑制情形，养生阶段禁止所有车辆驶入通行，小型施工车辆需借便道绕道行驶^[5]。

4.3 质量控制要点

4.3.1 原材料全过程管控

构建一套“进场检验-存储管理-使用监督”式的原材料质量管控体系，需对水泥逐批次开展初凝时间 (≥3h)、终凝时间 (≤6h)、安定性与强度指标的检测；每 2000m³ 的集料应检测一次压碎值 (要求 ≤28%)、针片状含量 (要求 ≤15%)、含泥量 (要求 ≤3%)。用砖砌成的隔墙对集料堆场分隔，顶部覆盖彩钢瓦来抵御雨水，防止细集料含水率的波动影响到配比的精确性，拌和站装配自动计量系统，每小时抽查水泥与集料的称量误差，把允许偏差把控在 ±1% 以内。

4.3.2 施工过程动态监测

运用“设备监测、人工检测与数据分析”相结合的质量监控方式，把在线监测系统安装到拌和楼，实时记录混合料相关的含水率、水泥剂量、出料温度等参数，自动对异常数据进行报警，摊铺机装配有超声波找平仪，使摊铺厚度误差被控制至 ≤±5mm，每 2000 平方米范围检测 8 个压实度点位，采用灌砂法和核子密度仪双管齐下控制；每天要制作 3 组无侧限抗压强度试件，凭见证要求取样送检，创建质量相关数据库，借助 BIM 技术对基层施工流程开展模拟，预先判断施工的薄弱环节。

表 1 优化后骨架密实型集料级配

筛孔尺寸 (mm)	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
通过质量百分率 (%)	100	65	35	28	22	12	4

5 结论

水泥稳定基层借助荷载扩散和刚度支撑，大幅增强了路基的承载能力，材料性能与施工质量成为关键影响因子，合理掌握水泥剂量处于 4% - 6% 区间、改善集料级配、保证压实度，可显著增强基层强度及其稳定性，增进路基的承载实力。施工之际应重视压实工艺、养生相关措施与防水处理工作，强化原材料及过程的质量把控，使基层与路基达成协同配合，往后可深入探索再生材料在水泥稳定基层中的应用，推进绿色公路的建设步伐。

参考文献

- [1] 张浩.公路路基强夯施工参数取值及技术要点探析[J].交通世界,2024,(32):23-25.
- [2] 张国华.含砾粒黏土路基填土碾压特性及效果分析[J].交通世界,2024,(30):99-101+148.
- [3] 陈良锐,何俊雄.基于检测试验的路基承载力特性评价分析[J].工程建设,2024,56(09):65-69.
- [4] 杨梦佳,林树锋,史先振,等.基于试验法的路基路面承载力研究[J].鄂州大学学报,2024,31(05):104-107.
- [5] 杨梦佳,史先振,孙亭亭,等.路基承载力试验与应用研究[J].科技资讯,2024,22(16):137-139.