

水泥稳定碎石基层强度检测与施工控制

徐小龙

安徽省路桥试验检测有限公司

【摘要】在道路结构的主要承重层为水泥稳定碎石基层，其施工质量关系着道路使用时间，需要强度达标且选取匹配的施工工艺。本文从现行规范角度分析，并结合工程实践，对水泥稳定碎石基层的强度形成机理进行详细的分析，从原材料控制、配合比优化、施工工艺参数控制三个维度构建了全流程质量控制体系。通过对无侧限抗压强度检测方法、检测频率及强度评定标准的系统梳理，明确了强度检测中的关键技术要点。以“X131线皋兰至什川公路延伸段工程”为典型案例，在施工中采用低水泥掺量梯度配比、双层连铺工艺及智能压实监控技术，水泥稳定碎石基层的强度达标，降低了干缩裂缝密度，在检测控制体系的支持下，平衡强度并达到抗裂性需求，使其生命周期成本降低。

【关键词】水泥稳定碎石；基层强度；无侧限抗压强度；施工控制；检测技术

Strength Testing and Construction Control of Cement-Stabilized Gravel Subgrade

Xu Xiaolong

Anhui Road & Bridge Testing & Inspection Co., Ltd.

【Abstract】The primary load-bearing layer of road structures consists of cement-stabilized gravel subgrade, where construction quality directly impacts service life. Ensuring strength compliance and selecting appropriate construction techniques are critical. This paper analyzes the strength formation mechanisms of cement-stabilized gravel subgrade based on current standards and engineering practices, establishing a comprehensive quality control system through three dimensions: raw material control, mix proportion optimization, and construction process parameter management. By systematically reviewing unconfined compressive strength testing methods, inspection frequency, and strength evaluation criteria, key technical requirements for strength testing are clarified. Using the "X131 Gaolan-Shichuan Highway Extension Project" as a case study, the implementation of low-cement gradation mix design, dual-layer continuous paving technology, and intelligent compaction monitoring systems achieved subgrade strength compliance while reducing dry shrinkage crack density. Supported by the testing control system, balanced strength was maintained to meet crack resistance requirements, ultimately lowering lifecycle costs.

【Key words】cement-stabilized crushed stone; base course strength; unconfined compressive strength; construction control; testing technology

引言

目前，我国的高等级公路和城市道路的主要基层结构形式，主要为水泥稳定碎石基层，其优势在于板体性好、强度高、水稳定性优良等^[1]。但是，实际工程项目中，受到基层强度低或强度变异过大的影响，就会出现早期破坏、反射裂缝等质量缺陷。这些质量缺陷是多原因导致的，如：材料配合比设计不合理、施工中缺乏有效控制、缺乏科学的检测评定等^[2]。

水泥稳定碎石基层最核心的性能指标为强度，此过程属于复杂的物理化学过程，面对多因素的协同影响，如：受水泥剂量、集料级配、含水率、压实度、养生条件等^[3]。传统的强度控制一般在事后检测，对施工前期质量控制和施工过程动态调整未重视。为确保水泥稳定碎石基层的质量，需要

采用有效检测方法进行强度检测，并做好施工控制。

1 水泥稳定碎石基层强度形成机理

1.1 强度构成与影响因素

水泥稳定碎石的强度构成源自，水泥水化产物的胶结作用、集料颗粒之间的“嵌挤锁结”作用、以及水泥水化产物与集料界面的黏附作用。水泥水化生成的 C-S-H 凝胶、钙矾石等产物填充集料孔隙，将松散颗粒胶结成整体。采用科学的级配设计，可以保证粗集料形成骨架，细集料填充空隙，形成最大化的“内摩阻力”^[4]。强度的影响因素较多，大致分为材料、配合比因、工艺因素、环境因素。这些因素相互作用，共同决定最终强度。

1.2 水泥剂量和强度的关系

强度受到水泥剂量影响较高,水泥剂量和基层强度呈现正相比关系,从深层分析,并不是简单的线性关系,如果水泥剂量不超过3%,水泥浆不足以充分包裹集料颗粒,强度增长比较缓慢;如果水泥剂量在6%以上的时候,强度增长趋缓,但是会形成显著的收缩开裂风险。考虑到经济因素和技术因素,水泥剂量的最佳选择为4%,可同时兼具强度和抗裂性^[5]。

2 强度检测方法 with 评定体系

2.1 无侧限抗压强度检测技术

无侧限抗压强度是评价水泥稳定碎石基层力学性能的核心指标,反映材料在无侧向约束条件下抵抗垂直压力的极限能力。在施工碾压现场的强度检测中,一般可使用“钻芯法”取芯样,或在试验室按工地预定压实度采用静压法成型试件。标准试件尺寸为 $\phi 150\text{mm} \times 150\text{mm}$,每组试件数量根据变异系数确定,选取数量在9个以上。试件在标准养护室养生(温度 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,湿度 $\geq 95\%$),养生期最后一天浸水24小时。对于7d强度检测,采用“6d保湿养生+1d浸水”的模式。

将试件置于压力试验机上,以 $1\text{mm}/\text{min}$ 的恒定加载速率垂直施压,直至试件破坏,记录最大压力。抗压强度按下式计算:

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (2-1)$$

式中, R_c 为抗压强度(MPa), P 为破坏荷载(N), A 为试件截面积(mm^2)。

2.2 强度评定标准与统计方法

根据《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1-2004)附录G,半刚性基层强度评定采用数理统计方法,按以下公式计算评定值:

$$R_c \geq R_d / (1 - Z_a C_v) \quad (2-2)$$

式中, R_c 为强度平均值, R_d 为设计强度, Z_a 为标准正态分布表中随保证率而变的系数(高速公路、一级公路保证率取95%, $Z_a=1.645$;二级及以下公路保证率取90%, $Z_a=1.282$), C_v 为变异系数。当强度评价值大于等于设计强度时,该路段强度评为合格。

该路段水泥稳定碎石基层13个芯样7d无侧限抗压强度平均值为 7.02MPa ,标准差 0.61MPa ,变异系数 0.087 ,强度评价值 6.21MPa 大于设计强度 3.0MPa ,满足设计及规范要求,评定为合格。

2.3 其他相关检测指标

除无侧限抗压强度外,基层质量检测还需关注以下指标:压实度:反映现场碾压密实程度,采用灌砂法或核子密度仪测定,要求不小于98%。压实度不足将直接导致强度下降、变形增大。含水率:控制拌合与碾压效果的关键指标,要求控制在最佳含水率的 $\pm 1\%$ 范围内。劈裂强度:评价基层抗裂性能的指标,通常要求不小于 0.5MPa 。级配偏差:检查集料级配与设计级配的符合程度,关键筛孔通过率偏差

不超过5%。

3 施工过程控制关键技术

3.1 原材料质量控制

原材料的稳定性是保证基层强度的首要前提。水泥宜选用42.5级普通硅酸盐水泥,初凝时间大于4h,终凝时间大于6h,不得使用快硬水泥、早强水泥及受潮变质水泥。碎石的压碎值不大于30%,针片状颗粒含量不超过15%,含泥量严格控制。水泥稳定碎石基层原材料技术要求,如表1所示:

表1 水泥稳定碎石基层原材料技术要求

材料类型	检测项目	技术指标	检测频次	备注
水泥	细度(80 μm 筛余)	$\leq 10\%$	每批进场	PO 42.5级
	初凝时间	$\geq 4\text{h}$	每批进场	
	终凝时间	$\geq 6\text{h}$	每批进场	
	3d抗压强度	$\geq 16\text{MPa}$	每批进场	
	28d抗压强度	$\geq 42.5\text{MPa}$	每批进场	
碎石	压碎值	$\leq 30\%$	每2000 m^3	粒径5-31.5mm
	针片状含量	$\leq 15\%$	每2000 m^3	
	含泥量	$\leq 1\%$	每2000 m^3	

3.2 配合比优化设计

级配设计应优先采用骨架密实型结构,通过调整各档集料比例,使粗集料形成骨架,细集料填充空隙。这种结构既能保证强度,又可减少水泥量,降低收缩开裂风险。典型骨架密实型级配范围:31.5mm筛孔通过率100%,19mm筛孔通过率68%-86%,4.75mm筛孔通过率22%-32%,0.075mm筛孔通过率0%-3%。

3.3 拌合与运输控制

混合料拌合采用厂拌法,配料系统应定期标定,确保计量精度。拌合过程中实时监测水泥剂量与含水率,水泥剂量按设计配合比增加0.5%控制,以补偿运输与摊铺过程中的损耗。夏季施工时,可预先对碎石洒水湿润,使混合料碾压时含水率不低于最佳值。运输车辆应配备篷布覆盖,减少水分蒸发和污染。运输过程中避免急转弯、急刹车,防止混合料离析。从拌合到碾压完成的时间应控制在水泥初凝时间内,通常不超过3h。

3.4 摊铺与碾压工艺

摊铺采用两台摊铺机梯队作业,确保连续、匀速、不间断。摊铺速度控制在 $2-6\text{m}/\text{min}$,避免速度突变造成离析。摊铺后设专人跟机,及时消除粗集料集中带。碾压按“静压-弱振-强振-静压”的程序进行,遵循“先轻后重、先慢后快、由低到高”的原则。初压采用双钢轮压路机静压1-2遍,复压采用振动压路机振压3-4遍,终压采用胶轮压路机收面。碾压过程中严格控制速度,初压 $1.5-2\text{km}/\text{h}$,复压 $2-3\text{km}/\text{h}$,终压 $3-4\text{km}/\text{h}$ 。压实度达到98%时,基层抗剪强度可达 250kPa 以上。

3.5 养生与交通管制

碾压成型后应及时养生,采用土工布覆盖并洒水保湿,养生期不少于7d。养生期间保持基层表面始终湿润,严禁车辆通行。温度对强度发展影响显著,15~25℃为最佳施工温度范围,低温时强度增长缓慢,高温时水分蒸发过快易产生干缩裂缝。

4 工程案例与应用效果

4.1 工程概况

X131线皋兰至什川公路延伸段什川黄河大桥工程位于高湿度软土地区,地质条件复杂,对基层强度与抗变形能力提出了更高要求。工程采用水泥稳定碎石基层,设计厚度36cm,设计强度 $7d \geq 3.5\text{MPa}$ 。

4.2 质量控制措施

4.2.1 加强材料优化

在水泥品种选择上,经对比试验选定P·O 42.5级普通硅酸盐水泥,其初凝时间210min、终凝时间310min,满足双层连铺工艺对凝结时间的要求。通过不同水泥剂量(3.0%、3.5%、4.0%、4.5%、5.0%)的强度与干缩对比试验,发现当水泥剂量超过4.2%后,强度增长趋缓而干缩应变显著上升。最终确定最佳水泥剂量4.2%,较常规设计(5.0%~5.5%)降低15%以上,在保证强度的同时有效抑制收缩开裂。集料级配采用骨架密实型结构设计,以“贝雷法”优合成级配化。将集料分为:1#料(19~31.5mm)占比25%、2#料(9.5~19mm)占比35%、3#料(4.75~9.5mm)占比22%、4#料(0~4.75mm)占比18%。通过调整各档比例,确保粗集料形成骨架嵌挤结构,细集料填充空隙但不撑开骨架。优化后的合成级配在4.75mm筛孔通过率为28%,0.075mm筛孔通过率控制在2.5%以内,粗集料间隙率(VCA)小于捣实状态下粗集料间隙率,由此在较低水泥用量下仍可获得较高强度。

4.2.2 加强工艺创新

引入水泥稳定碎石基层双层连铺工艺。采用2台摊铺机梯队作业,摊铺速度控制在2.0m/min,松铺系数按1.30控制。碾压遵循“静压-弱振-强振-静压”程序,先采用双钢轮压路机静压1遍(速度1.8km/h),再使用“振动压路机”降低振动强度1遍(速度2.0km/h)、强振3遍(速度2.2km/h),最后胶轮压路机收面2遍。碾压完成后立即进行压实度检测,确保下层压实度 $\geq 98\%$ 。下层碾压完成后2h内可上层

摊铺,下层混合料未完全初凝,仍存在水泥水化反应,上层摊铺碾压可使两层水泥浆相互渗透,在界面处形成化学胶结,达到“湿接湿”连接。上层摊铺速度略快于下层,控制在2.5m/min,松铺系数调整为1.28。碾压工艺和下层一致,但增加1遍强振以确保整体压实度。

4.2.3 智能监控

项目深度融合物联网与智能感知技术,构建覆盖拌合、运输、摊铺、碾压、养生全过程的智能监控体系。安装配料监测系统,实时采集各档料计量、水泥剂量、含水率等参数,每5分钟上传云端。设定偏差预警阈值,超限即通过手机APP报警,确保拌合质量。每车安装北斗定位终端,实时追踪位置。系统自动计算从拌合到摊铺的延迟时间,当接近初凝时间时向现场调度发送预警,避免混合料失效。压路机安装压实质量监控器,预设碾压速度和遍数。操作偏离时驾驶室自动报警;系统实时记录碾压轨迹并生成遍数分布云图,管理人员可随时查看并指导补压。洒水车安装GPS和水量传感器,管理人员通过APP监控洒水路线和频次。基层表面布设温湿度传感器,湿度低于80%时自动通知洒水,确保养生效果。

4.3 效果分析

实施后的效果,基层7d浸水抗压强度平均值为4.8MPa,28d强度达5.4MPa,满足设计要求。干缩裂缝密度降至0.3条/ m^2 ,较常规工艺降低60%以上。物联网延迟时间管控技术使混合料时效合格率达98.6%,土工格栅强化段差异沉降率降低至0.8mm/m。经测算,该技术体系可降低全生命周期成本约28%。

5 结论

道路工程中,水泥稳定碎石层是确保其稳定安全的重要基层,其质量受到多维度影响,结合经济和技术的考虑,4%左右的水泥剂量可达到最佳强度。经过严格的强度检测,为提高水泥碎石层的质量,则需要严格控制原材料、设计科学配比,并做好摊铺碾压养生,对其全过程进行控制,结合实际工程验证,低水泥掺量梯度配比与智能监控技术应用效果,对强度进行平衡,且得到较强的抗裂性,形成“原料-过程-成品”三位一体的检测控制体系,全面提高道路基层施工质量,提高道路使用时间。

参考文献

- [1]赵勋.公路工程水泥稳定碎石基层施工离析控制技术与检测方法研究[J].陕西建筑,2025(9):34-37.
- [2]李高健.水泥稳定碎石基层施工技术与管理控制措施[J].四川水泥,2025(4):221-223.
- [3]毕林.水泥稳定碎石基层施工质量控制[J].市政设施管理,2024(1):54-56.
- [4]王君伟.水泥稳定碎石基层施工影响因素及控制措施[J].工程建设与设计,2025(7):226-228.
- [5]刘志涛.水泥稳定碎石基层施工中粗细集料离析现象分析与控制措施探讨[J].四川水泥,2025(3):278-280.