

无机结合料稳定材料 7d 无侧限抗压强度影响规律 及工程控制研究

妥尚哲 叶 凡

新疆生产建设兵团建设工程质量检测中心有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘 要】：在公路土建工程中，无机结合料稳定材料是构成基层与底基层的主要填筑材料，因其刚度高整体性强、造价经济性优的综合优势，被广泛应用于各等级道路工程的建设。7d 无侧限抗压强度是该类材料最核心的早期质控指标，既是配合比设计的核心依据，也是评判路面基层成型质量、承载能力的关键指标，直接关系到道路运营期的行车安全和使用寿命。为有效解决工程中常见的强度波动大、达标率不高等实际问题，本文结合工地试验数据与现场施工经验，系统分析了结合料剂量、集料品质、拌和含水率、压实参数及养护环境五大要素对材料早期强度的影响规律，梳理了试验检测与现场施工中的常见质量漏洞，并制定了全流程、可落地的质量管控方案。研究表明，上述各类施工参数主要通过改变材料内部水化反应进程、集料嵌挤结构状态及孔隙分布特征，来调控 7d 无侧限抗压强度的增长效果。科学优化施工参数、严格规范试验与施工工艺，能够从源头规避基层开裂、不均匀沉降等病害，大幅提升路面基层施工质量。本文兼顾理论分析与工程实践，可为同类道路基层材料配合比优化及现场质量管控提供实用的技术参考。

【关键词】：无机结合料稳定材料；无机结合料稳定材料压实度；基层底基层施工

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.085

1 引言

在现代公路工程施工体系中，无机结合料稳定材料是路面承重结构的基础核心材料，已广泛应用于各等级公路的基层施工。从一线施工经验来看，材料成型后的抗变形能力、耐久性与结构稳定性，均取决于其早期强度发展状况。7d 无侧限抗压强度是行业内公认的早期质量判定指标，该方法操作简便、检测准确，能够直观反映混合料固化后的基础力学性能，是控制基层施工质量的第一道关键关口。

依据现行《公路路面基层施工技术细则》的强制要求，7d 无侧限抗压强度属于工程验收过程中的必检项目，检测结果直接判定施工段落是否合格、能否进入下一道施工工序。然而，在日常工地检测和室内试验中，常出现一种矛盾现象：采用同一设计配合比，不同批次试件或不同施工段落的强度数据却参差不齐。部分段落强度不达标，需返工整改；部分段落强度富余过高，造成材料浪费，不仅延缓施工进度，也增加了工程建设成本。

此类质量问题频繁发生，根本原因在于多数现场施工和试验人员仅片面关注结合料掺量这一单一指标，对材料早期强度的形成机理认识不足，忽视了含水率、压实度、养护温湿度等配套参数的协同影响，难以准确把握各因素对强度的制约作用。针对这一工程痛点，本文系统剖析了无机结合料稳定材料 7d 无侧限抗压强度的形成机理，量化分析了各项关键参数的影响程度，并结合施工现场常见的质量问题，提出针对性的优化与整改措施，旨在为提升道路基层施工质量、降低路面早期病害发生率提供理论支撑与实践参考。

2 无机结合料稳定材料 7d 抗压强度形成机理

无机结合料稳定材料属于半刚性复合材料，以水泥、石灰、粉煤灰等无机胶凝材料为粘结基体，以碎石、机制砂等粗细集料为承重骨架，经均匀拌和、机械压实及恒温恒湿养护后，形成致密的整体结构。其 7d 早期抗压强度的形成，是胶凝材料水化硬化与集料颗粒嵌挤锁结双重作用叠加的结果。材料早期硬化的主要过程与强度快速增长，基本集中在前 7d 养护期内，这也是将 7d 作为早期强度检测关键节点的根本依据。

从微观材料学角度分析，无机胶凝材料与水接触后，迅速发生水化反应，生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等凝胶产物。这些凝胶物质具有极强的粘结力，能充分包裹集料颗粒表面，并填充颗粒间空隙与孔隙，将原本松散的集料胶结为连续、稳固的整体。在标准 7d 养护周期内，水化反应持续高效进行，凝胶产物不断积累，材料内部孔隙率持续降低，结构密实度逐步提升。宏观上即表现为试件抗压强度持续增长，并完成早期力学性能的定型。

从工程实践角度看，这一过程本质上是混合料由松散状态逐步硬化、成型的过程。养护前 1~3d 为水化反应最剧烈的阶段，强度增长速率最快，是基础结构成型的关键期；3~7d 反应速率逐渐放缓，但材料内部结构持续致密化。养护满 7d 后，材料的早期基准强度已基本稳定，后续养护虽有一定强度增长，但整体结构与基础力学性能不会发生显著变化。因此，通过 7d 抗压强度检测，可快速、准确地判定材料的成型质量，完全满足工程快速验收的需求。

3 无机结合料稳定材料 7d 无侧限抗压强度的关键影响因素

3.1 无机结合料掺量

无机结合料剂量是配合比设计的核心参数,也是决定材料 7 d 无侧限抗压强度的首要因素。在规范允许的合理范围内,结合料剂量与材料早期强度呈显著正相关。从力学机理分析,适度提高结合料剂量可增加体系内有效胶凝组分的含量,促进水化产物大量生成,增强集料颗粒间的粘结力,并充分填充结构内部孔隙,从而提升复合材料的整体性与密实度,最终实现 7 d 抗压强度的持续增长。

多项室内对比试验数据均验证了这一规律。以常用的水泥稳定碎石材料为例,当水泥剂量从约 4%提高至约 7%时,试件 7 d 无侧限抗压强度可提升 30%~50%,强度增益效果十分显著。然而,在现场施工中,普遍存在一种认知误区,即一味通过增加结合料剂量来拔高强度。实际上,过量掺加胶凝材料弊大于利:虽然能大幅提升早期强度,但会使材料内部水化反应过于剧烈,硬化后产生较大的干缩与温缩应力,极易引发基层不规则开裂,严重影响道路的长期使用性能。同时,超量投料还会推高施工成本,造成原材料浪费。因此,工程中必须依据设计标准,通过多梯度剂量试验确定最优掺量,在强度、耐久性与经济性三者之间取得合理平衡。

3.2 集料级配与原材料性能

集料是无机结合料稳定材料的承重骨架,其级配组成、压碎值、针片状含量等关键指标,直接决定骨架结构的稳定性,对 7 d 无侧限抗压强度的量值及其稳定性影响显著。级配良好、粒径搭配合理的集料,能够形成高密实度的嵌挤结构:粗集料构成主骨架,承担外部荷载;细集料精准填充空隙;再辅以水化产物的胶结作用,可最大限度提升材料的抗压能力与结构整体性。

反之,若集料粒径单一、级配不良,骨架内部空隙率将大幅增加,颗粒间的嵌挤锁结作用显著削弱。即使结合料剂量满足设计要求,成型材料仍会因结构松散、整体性差,导致 7 d 强度偏低且检测数据离散性大。此外,集料压碎值是另一项不可忽视的关键指标。压碎值超标意味着集料自身抗压强度不足,在荷载作用下易发生破碎,无法有效传递与分散应力,从而直接削弱材料的整体承载力。因此,原材料进场时必须严格检验各项技术指标,优先选用洁净、级配优良、压碎值合格的集料,从源头保障强度质量。

3.3 拌和含水率与最佳含水率偏差

拌和含水率是调控水化反应速率、保障混合料压实质量的关键参数。施工现场 7 d 无侧限抗压强度不达标的情况,绝大多数源于含水率控制失准。每一组既定配合比的无机结合料混合料,均对应一个最佳含水率。在该含水率条件下,混合料拌

和最为均匀、和易性最优,压实后的结构密实度最高,可为水化反应的充分进行提供理想条件,从而使材料发挥出最佳的早期力学性能。

若实际拌和含水率低于最佳值,混合料偏干涩,胶凝材料无法充分润湿与活化,水化反应不彻底;同时,混合料不易压实,成型后内部残留大量连通孔隙,直接导致 7 d 抗压强度不足。反之,若含水率过高,混合料过湿黏稠,压实过程中易出现泌水、集料离析等现象,试件内部形成积水孔隙,养护水分蒸发后留下空洞缺陷。这不仅降低结构密实度、削弱强度,还会大幅增加材料干缩开裂的风险。因此,现场施工中应根据天气状况及集料含水率的实时变化,动态调整拌和加水量,确保含水率始终处于合理区间。

3.4 压实工艺与压实度

压实工艺与压实度是混合料成型质量的核心保障,直接关系到材料固化前的初始密实状态,是 7 d 无侧限抗压强度达标的重要前置条件。压实度越高,集料颗粒排列越紧密,内部孔隙率越低,胶凝产物的胶结效率越高,早期强度增长效果越好,且稳定性越强。依据现行施工规范,无机结合料稳定材料基层的压实度须不低于 96%。现场一旦出现欠压、漏压情况,即使压实度仅偏低 2%~3%,也可能导致 7 d 抗压强度下降 10%~20%,对早期力学性能的影响十分显著。

除压实度指标外,成型工艺同样影响强度检测结果的代表性。室内试验常用的静压法与振动法两种成型方式,效果差异明显。振动成型所得试件的密实状态与现场机械碾压工况高度吻合,据此测得的 7 d 强度数据更能反映工程实际;而传统静压成型试件的密实度偏低,检测强度普遍低于现场真实水平,易导致试验数据与现场质量脱节。此外,现场碾压速度过快、碾压遍数不足或碾压组合不合理,均会造成基层压实不均匀,产生局部密实度缺失,进而导致同批次试件强度离散性增大,干扰工程验收评判。

3.5 养护环境与养护周期管控

养护是材料强度稳步增长、结构持续密实的关键阶段。7 d 养护周期内的温湿度条件直接决定水化反应的进程,是早期强度形成的重要保障。无机结合料的水化反应对环境温湿度极为敏感,标准养护条件为温度 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度不低于 95%。稳定的恒温恒湿环境能够保证水化反应持续平稳进行,使材料 7 d 无侧限抗压强度稳定达到设计要求。

从现场施工情况来看,高温干燥天气下若未及时洒水并覆盖养护,基层表层水分迅速蒸发,表层水化反应将提前终止,内部反应亦受抑制,最终造成整体 7 d 强度偏低,且易引发表层起砂、浅层开裂等病害。当环境温度低于 5°C 时,水化反应速率大幅减缓,强度增长基本停滞,导致强度无法满足验收要求。此外,养护期间基层遭受车辆碾压、长期积水浸泡等不良

工况,均会破坏尚未完全固化的结构体,造成强度损伤。这些环节是现场养护管控的重中之重。

4 7d 抗压强度试验与施工质量控制措施

4.1 优化配合比设计,精准把控结合料掺量

配合比设计是强度质量管控的源头环节,应以7d无侧限抗压强度为核心指标,依据道路荷载等级与工程设计强度要求,开展多梯度室内配比试验。通过设置多个结合料剂量水平(如4%、5%、6%等),开展多组平行力学试验,测定不同剂量下材料的抗压强度及干缩性能,并结合经济成本分析,综合筛选出最优剂量方案。同时,原材料性能存在批次差异,施工过程中需定期复核材料技术指标,及时微调施工配合比,从源头控制强度偏差,确保早期强度稳定达标。

4.2 严控原材料与拌和参数稳定性

稳定的原材料品质与拌和工艺参数,是保障强度均匀性的基础。原材料进场时,须严格检验集料级配、压碎值、塑性指数,以及无机结合料的凝结时间、强度等级等关键技术指标,杜绝不合格材料投入使用。拌和作业应统一采用集中厂拌工艺,确保集料与胶凝材料拌和均匀,避免混合料离析、局部胶凝材料富集等问题;同时,实时监测集料天然含水率,结合环境温湿度动态调整拌和加水量,将实际含水率严格控制在最佳含水率 $\pm 1\%$ 的范围内,为水化反应与压实成型创造良好条件。

4.3 规范压实成型工艺,保障结构密实度

室内试验应统一成型工艺标准,优先采用振动成型方式,以缩小试验强度与现场实际强度之间的偏差。每组试验至少制备6个平行试件,按规范剔除异常数据,以降低试验误差。现场施工须严格落实专项碾压方案,合理配置碾压设备,规范控制碾压速度、顺序与遍数,采用分层摊铺、分层压实、分层检

测的施工模式,确保全断面压实度均匀达标,杜绝漏压、欠压、过压等不当作业。压实完成后应及时检测压实度,不合格段落立即返工补压,全面保障结构密实度。

4.4 强化7d 养护全过程管控

基层压实成型后,应立即铺设土工布或防水薄膜进行全覆盖保湿养护,阻断水分蒸发通道,标准养护时间不得少于7d。高温天气应加密洒水频次,始终保持基层表面处于湿润状态,防止失水干缩;低温天气须采取保温防护措施,避免低温冻害抑制强度增长。养护区域应全程封闭管控,禁止车辆通行与重物堆放,及时排除表面积水,防止结构因水浸泡受损,确保水化反应充分、持续进行,保障7d抗压强度稳定达标。

5 结论

无机结合料稳定材料的7d无侧限抗压强度,是评判材料早期成型质量与基层施工合格性的核心技术指标。其强度形成是胶凝材料水化胶结与集料骨架嵌挤锁结协同作用的结果。结合料剂量、集料品质、拌和含水率、压实工艺及养护条件,是影响早期强度的五大关键因素,各因素相互关联、协同作用,共同决定材料7d强度的量值及稳定性。

在工程实践中,仅管控结合料剂量无法根本解决强度波动问题,必须构建“配合比优化、原材料管控、工艺规范化、养护保障”的全流程闭环质量控制体系。通过精准优化施工参数、严格规范试验检测标准、精细管控现场施工环节,能够有效提升7d强度合格率与稳定性,减少基层开裂、不均匀沉降等早期病害,全面提升路面基层施工质量与长期服役性能。后续可针对高温、低温、多雨等复杂施工工况,进一步探究材料早期强度的变化规律,为特殊环境下的基层施工提供更加完善的技术支撑。

参考文献:

- [1] 王浩,张磊.水泥稳定碎石7d无侧限抗压强度多因素耦合影响研究[J].公路交通科技,2025,42(03):78-85.
- [2] 刘景,陈宇.无机结合料基层强度离散成因与全过程质量控制技术[J].中外公路,2025,45(06):112-117.
- [3] 赵文博.温湿度及压实参数对半刚性基层早期强度的作用机理[J].公路工程,2025,50(02):168-174.