

无机结合料稳定材料拌和均匀性对基层强度增长规律的影响

叶海娟

江苏鼎信检测技术有限公司 江苏 泰州 225300

摘要：本文聚焦于无机结合料稳定材料拌和均匀性对基层强度增长规律的影响。首先阐述了无机结合料稳定材料在道路工程中的重要性，接着深入分析了拌和均匀性的内涵及影响因素，包括原材料特性、拌和设备与工艺等。通过室内试验和现场试验相结合的方法，研究了不同拌和均匀性条件下基层强度随时间的增长规律，发现拌和不均匀会导致强度增长异常，如局部强度不足或增长过快等问题。最后提出了提高拌和均匀性的措施，以提高基层强度增长的质量和稳定性，为道路工程设计与施工提供理论依据和技术支持。

关键词：无机结合料稳定材料；拌和均匀性；基层强度；增长规律

1 引言

道路工程中，基层是路面结构关键部分，要承受并传递车辆荷载。无机结合料稳定材料（如水泥稳定碎石等）因强度高、水稳定性好等优点，常用于基层施工。不过，其性能不仅取决于原材料质量与配合比，还和拌和均匀性紧密相关，后者影响材料组分分布，进而左右基层强度增长规律与整体性能。本研究聚焦于此，旨在揭示拌和不均匀致强度异常的机制，为施工提供科学拌和工艺与控制指标，提高基层质量，延长道路寿命、降低成本。

2 无机结合料稳定材料拌和均匀性概述

2.1 拌和均匀性的定义

无机结合料稳定材料的拌和均匀性是指材料中无机结合料、集料和水等各组分在拌和过程中达到均匀分布的程度。均匀的拌和状态应保证每一部分材料中各组分的比例与设计配合比一致，不存在局部集中或缺失的现象。

2.2 影响拌和均匀性的因素

2.2.1 原材料特性

不同种类和规格的集料，其颗粒形状、表面纹理和密度等特性存在差异，这会影响集料在拌和过程中的运动和混合效果。例如，针片状颗粒较多的集料容易相互缠绕，导致拌和不均匀。无机结合料的细度和活性也会对拌和均匀性产生影响，细度较大的无机结合料更容易分散均匀。

2.2.2 拌和设备

拌和设备的类型、性能和工作参数对拌和均匀性起着关键作用。常见的拌和设备有强制式搅拌机和自落式搅拌机。强制式搅拌机通过搅拌叶片的强制搅拌作用，

能使材料混合更均匀，适用于拌和各种类型的无机结合料稳定材料；而自落式搅拌机则主要依靠物料的自重下落实现混合，拌和均匀性相对较差。此外，搅拌机的转速、搅拌时间和投料顺序等工作参数也会影响拌和效果。

2.2.3 拌和工艺

拌和工艺包括拌和方式、拌和顺序和拌和时间等。合理的拌和方式应能使各组分充分接触和混合，例如采用分次投料的方式可以提高拌和均匀性。拌和顺序也会影响材料的混合效果，一般应先投入集料，再加入无机结合料，最后加水进行拌和^[1]。拌和时间过短，材料无法充分混合均匀；拌和时间过长，则可能导致无机结合料提前水化，影响材料的强度增长。

3 试验设计与方法

3.1 原材料选择与配合比设计

3.1.1 原材料选择

选用符合《公路路面基层施工技术细则》（JTG/TF20-2015）要求的水泥、石灰、粉煤灰作为无机结合料。水泥采用P·O42.5普通硅酸盐水泥，其初凝时间不小于3h，终凝时间不大于6h，各项性能指标满足规范要求。石灰采用Ⅲ级以上钙质生石灰，有效钙加氧化镁含量不小于70%。粉煤灰采用Ⅱ级以上粉煤灰，烧失量不大于20%，比表面积不小于2500cm²/g。集料采用级配良好的碎石，最大粒径不大于31.5mm，其压碎值不大于26%，针片状含量不大于15%，含泥量不大于2%。

3.1.2 配合比设计

根据工程实际需求和原材料的性能，进行无机结合料稳定材料的配合比设计。以水泥稳定碎石为例，通过击实试验确定材料的最佳含水量和最大干密度。实验结

果表明,当水泥剂量为4%时,最佳含水量为5.5%,最大干密度为2.30g/cm³。按照设计强度要求,确定水泥的掺量为4%-6%,并进行不同水泥剂量下的无侧限抗压强度试验,绘制强度随水泥剂量变化的曲线,为施工提供合理的配合比参数。

3.2 拌和均匀性控制方法

为了研究不同拌和均匀性对基层强度增长规律的影响,采用以下方法控制拌和均匀性:

3.2.1 室内试验

在室内采用小型强制式搅拌机进行拌和,通过精确控制拌和时间 and 投料顺序来模拟不同程度的拌和不均匀情况。设置拌和时间为30s、60s和90s三种工况,分别代表拌和不均匀、基本均匀和均匀的状态^[2]。同时,采用一次性投料和分次投料两种投料顺序进行对比试验。一次性投料为将集料、水泥和水一次性加入搅拌机进行拌和;分次投料为先加入60%的集料和全部水泥,搅拌30s后,再加入剩余40%的集料和水,继续搅拌至规定时间。每种工况制作9个试件,进行重复试验,以确保数据的可靠性。

3.2.2 现场试验

在道路施工现场,选择不同的施工段落,采用不同的拌和设备 and 工艺进行施工。在第一段落采用强制式搅拌机,拌和时间为60s,投料顺序为先集料、后水泥、最后水;在第二段落采用自落式搅拌机,拌和时间为90s,投料顺序为一次性投料。在拌和过程中,每隔10m取样检测材料的均匀性。采用水泥剂量滴定法检测水泥含量,检测结果的标准偏差作为衡量水泥分布均匀性的指标;采用筛分试验检测集料的级配,以级配偏离设计要求的程度来评价集料混合的均匀性。根据检测结果,将施工现场划分为拌和均匀性好、中、差三个区域。

3.3 强度试验方法

按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441-2024)的要求,采用静压成型法制作无机结合料稳定材料试件,试件尺寸为直径150mm、高150mm的圆柱体。将试件在标准养护条件下(温度20±2℃,湿度 ≥ 95%)养护至规定龄期(7d、14d、28d、60d和90d),然后采用万能试验机进行无侧限抗压强度试验,加载速率为1mm/min,测定试件的抗压强度。每种工况下每个龄期测试6个试件,取平均值作为该工况下该龄期的抗压强度值。

4 不同拌和均匀性条件下基层强度增长规律研究

4.1 室内试验结果分析

4.1.1 不同拌和时间对强度增长规律的影响

通过对拌和时间为30s、60s和90s的试件进行强度试验,得到不同龄期的抗压强度数据,如下表所示:

表1 不同龄期的抗压强度

拌和时间 (s)	7d强度 (MPa)	14d强度 (MPa)	28d强度 (MPa)	60d强度 (MPa)	90d强度 (MPa)
30	2.80	3.52	4.20	4.84	5.06
60	3.20	4.07	5.04	5.81	6.29
90	3.55	4.34	5.59	6.21	6.53

从表中数据可以看出,拌和时间为30s时,由于拌和不均匀,材料中存在局部水泥集中或集料堆积的现象,导致试件的强度离散性较大,标准偏差达到0.3-0.4MPa,且整体强度较低。随着拌和时间的延长,拌和均匀性得到改善,试件的强度离散性减小,标准偏差降至0.1-0.2MPa,强度值逐渐提高。当拌和时间达到90s时,试件的强度增长规律趋于稳定,强度值达到较高水平。

4.1.2 不同投料顺序对强度增长规律的影响

对比一次性投料和分次投料两种投料顺序下试件的强度增长规律,实验数据如下:

表2 两种投料顺序下试件的强度增长

投料顺序	7d强度 (MPa)	14d强度 (MPa)	28d强度 (MPa)	60d强度 (MPa)	90d强度 (MPa)
一次性投料	3.02	3.87	4.66	5.43	5.86
分次投料	3.37	4.16	5.22	6.05	6.40

结果表明,分次投料可以显著提高拌和均匀性,使试件的强度离散性减小,标准偏差比一次性投料降低0.10-0.20MPa,强度值有所提高。这是因为分次投料可以使集料和水泥在拌和过程中充分接触和混合,避免了局部集中现象的发生,从而提高了材料的整体强度。

4.2 现场试验结果分析

4.2.1 不同拌和设备对强度增长规律的影响

在现场试验中,分别采用强制式搅拌机和自落式搅拌机进行拌和。不同拌和设备下基层强度随龄期的增长数据如下:

表3 不同拌和设备下基层强度增长

拌和设备	7d强度 (MPa)	14d强度 (MPa)	28d强度 (MPa)	60d强度 (MPa)	90d强度 (MPa)
强制式搅拌机	3.41	4.20	5.34	6.16	6.63
自落式搅拌机	2.95	3.67	4.42	5.06	5.43

实验表明,采用强制式搅拌机拌和的材料均匀性较好,基层的强度增长规律正常,强度值较高且离散性较小,标准偏差在0.20-0.30MPa之间。而采用自落式搅拌机拌和的材料存在一定程度的拌和不均匀现象,导致基层强度增长异常,局部区域强度较低,出现早期损坏的隐患,强度标准偏差达到0.30-0.40MPa。

4.2.2 不同施工段落拌和均匀性对强度增长规律的影响

通过对不同施工段落取样检测和强度试验,发现拌和均匀性好的段落,基层强度增长规律符合设计要求,强度值随龄期的增长逐渐提高,且强度离散性较小,标准偏差在0.20MPa以下。例如,在拌和均匀性好的段落,28d强度平均值达到5.20MPa,90d强度平均值达到6.50MPa。而拌和不均匀的段落,基层强度增长不稳定,部分区域强度增长过快,部分区域强度增长缓慢,甚至出现强度倒缩的现象。在拌和不均匀的段落,28d强度最大值与最小值相差可达1.50MPa,90d强度最大值与最小值相差可达2.00MPa。

5 拌和不均匀导致强度增长异常的机制分析

5.1 局部无机结合料集中

当材料中存在局部无机结合料集中时,这些区域的含水量会相对较低,无机结合料的水化反应速度较快,早期强度增长较快。然而,由于集料与无机结合料之间的粘结面积相对较小,随着龄期的增长,这些区域的强度增长会逐渐放缓,甚至可能出现强度倒缩的现象^[3]。实验数据显示,局部水泥集中区域的7d强度比正常区域高20%-30%,但90d强度比正常区域低10%-15%。同时,局部无机结合料集中会导致其他区域的无机结合料含量不足,强度增长缓慢,无法达到设计要求,影响基层的整体强度和耐久性。

5.2 集料堆积

集料堆积会导致材料中孔隙率增大,无机结合料无法充分填充孔隙,形成有效的粘结。在车辆荷载的作用下,集料之间容易发生相对滑动和位移,导致基层出现早期损坏。实验表明,集料堆积区域的孔隙率比正常区域高10%-15%,其抗压强度比正常区域低20%-30%。此外,集料堆积还会影响无机结合料的水化反应,由于水分分布不均匀,部分区域无机结合料水化不充分,降低了材料的整体强度增长。

6 提高拌和均匀性的措施

6.1 优化拌和设备选型

根据工程规模和材料特性,选择合适的拌和设备。对于大型道路工程,应优先选用强制式搅拌机,其搅拌效果好,能保证材料的拌和均匀性。同时,定期对拌和设备进行维护和保养,确保设备的正常运行,避免因设备故障导致拌和不均匀。例如,定期检查搅拌叶片的磨损情况,及时更换磨损严重的叶片,保证搅拌叶片与搅拌筒之间的间隙符合要求,提高搅拌效率和质量。

6.2 合理确定拌和工艺参数

通过试验确定最佳的拌和时间、投料顺序和搅拌机转速等工艺参数。一般情况下,拌和时间应根据材料的类型和拌和设备的性能确定,对于水泥稳定碎石,采用强制式搅拌机时,拌和时间宜控制在60-90s。投料顺序应采用先集料、后无机结合料、最后加水的方式,分次投料可以提高拌和均匀性。搅拌机转速应根据材料的特性和拌和效果进行调整,对于颗粒较粗的材料,转速可适当提高;对于颗粒较细的材料,转速应适当降低,避免转速过快导致物料飞溅。一般搅拌机转速宜控制在30-50r/min。

6.3 加强原材料质量控制

严格控制原材料的质量,确保集料的级配、粒径和形状等符合设计要求,无机结合料的细度、活性和含量等满足规范标准。对原材料进行定期检测和抽检,及时发现和处理质量问题,避免因原材料质量不稳定导致拌和不均匀。

6.4 强化施工过程管理

在施工过程中,加强对拌和过程的监控和管理,安排专人负责检查拌和设备的运行状态和材料的拌和质量。定期取样检测材料的均匀性,如水泥剂量、含水量和集料级配等,根据检测结果及时调整拌和工艺参数。同时,加强对施工人员的培训和技术交底,提高施工人员的质量意识和操作技能,确保拌和过程严格按照规范要求进行。

结语

本研究经室内与现场试验,深入探究了无机结合料稳定材料拌和均匀性对基层强度增长规律的影响。结论表明,拌和均匀性影响显著,不均匀会导致强度增长异常,影响整体性能与寿命;其影响因素多样,可通过优化设备、工艺等提高均匀性;不均匀致强度异常的机制在于局部无机结合料集中和集料堆积。尽管研究取得一定成果,但仍存不足,未来需进一步研究不同材料拌和均匀性的影响、结合数值模拟探究其对基层的影响,以及开展长期性能观测,为工程提供更全面支持与科学依据。

参考文献

- [1]刘锋,宿启鹏,孔令,等.无机结合料稳定材料弹性模量侧面法试验全自动化试验系统的研制[J/OL].公路,2025,(08):301-308[2025-08-22].
- [2]宾武,欧阳标.基于击实方法差异对无机结合料稳定材料密度和级配影响的思考[J].建材发展导向,2024,22(05):1-3.
- [3]李姝.基于不同下封层技术的沥青路面无机结合料稳定材料基层疲劳寿命分析[D].沈阳建筑大学,2020.