

振动频率对水稳料抗压强度形成的作用分析

陈红军 王金艳 孙兆伟 康超 王波

新疆北新科技创新咨询有限公司

摘要：振动频率是影响水稳料抗压强度生成的核心工艺参数，其通过支配水稳料颗粒级配重组、水分赋存状态及水化反应历程，深度参与并作用于强度形成全过程。适配的振动频率能够促使水稳料颗粒充分嵌锁致密，降低内部孔隙占比，提升骨架结构稳固性；同时为水泥水化反应创设适宜环境，促成胶凝体系均匀析出并紧密包覆骨料，进而大幅强化抗压强度。当频率偏离适配区间时，易诱发颗粒离析、水分迁移失衡或密实度不足等问题，阻碍强度生成进程。依托不同振动频率下的强度演化特征，界定最优频率范围，可为水稳料施工工艺优化提供核心支撑，保障其路用结构服役性能。

关键词：振动频率；水稳料；抗压强度；密实度；水化反应

引言

水稳料凭借优异的承载效能与结构稳定性，已然成为道路工程基层施工的核心选材，其抗压强度深刻影响道路结构承载能力与服役年限。在水稳料制备及施工环节中，振动压实堪称调控强度生成的核心工序，振动频率作为核心工艺变量，对强度演化进程的影响贯穿颗粒密实、水化反应乃至结构成型全阶段。在当前工程实操中，振动频率选取的盲目性常引发水稳料强度不足或性能离散问题，学界及工程界却缺乏系统探究来厘清其与强度形成的内在作用关联。立足这一现状，本文聚焦振动频率对水稳料抗压强度形成的作用机制展开深入探究，为施工工艺优化与性能提升提供理论依据，为下文具体研究内容做好铺垫。

1 水稳料抗压强度形成及振动频率影响的工程背景

1.1 水稳料在道路工程中的应用基础

水稳料系由水泥、骨料、水及外加剂按特定配比拌合形成的半刚性材料，依托自身优异的承载稳定性、抗形变性能与经济合理性，已然成为高等级公路、城市主干道等交通工程基层及底基层施工的核心选材。道路基层承担路面结构承重核心职能，需高效传导行车荷载并将应力分散至路基，水稳料施工质量深刻影响路面结构整体耐久性与通行安全性，适用场景遍及平原、丘陵等多样地形条件下的交通基础设施建设，构成道路工程长期服役的核心材料保障。

1.2 水稳料抗压强度的核心工程价值

抗压强度乃评判水稳料路用性能的核心指标，该性能的形成质量深刻影响道路基层的承载阈值与服役年限。当抗压强度未达设计标准时，往往引发道路基层在行车循环荷载作用下出现开裂、沉陷、推移等病害，最终造成路面破损，抬升后期养护投入与交通阻断隐患^[1]。水稳料抗压强度的形成依托颗粒间的紧密嵌锁、

水泥水化产物的胶结效应，二者协同效能受施工工艺参数的关键制约；振动压实工艺堪称提升密实度与强度的核心工序，该工序参数的适配性直接主导强度生成效果。

1.3 振动频率参数的工程应用现状

当前水稳料施工实操中，振动压实工艺的参数配置多以传统施工经验为核心参照；振动频率作为核心调控变量，其配置欠缺系统性理论支撑与针对性研判。各异的工程情境中，施工主体多沿用固定频率配置，未能充分兼顾骨料级配、水泥掺量等物料特性的差异化特征，引发振动能量传导不均，最终致使部分工程出现水稳料密实度不足、强度离散性大等问题。此类参数配置的盲目性，既局限了水稳料性能潜力的充分释放，又提升了工程质量管控的复杂程度，佐证了明晰振动频率对其抗压强度形成影响的工程必要性。

2 振动频率影响水稳料抗压强度形成的作用机制与核心问题

2.1 振动频率调控水稳料强度形成的内在机制

振动频率借助振动力能传导支配水稳料颗粒运动模式、水分赋存状态与水化反应历程，以此作用于强度生成过程。振动力能的传导效率随频率改变表现出显著差异，当振动频率与水稳料颗粒固有运动特征相匹配时，能够促使骨料颗粒挣脱摩擦力束缚完成有序重排，达成颗粒间的致密嵌锁，缩减孔隙占比并构筑稳固骨架体系。与之相应，适配的振动频率可推动水分在物料体系内均匀运移，规避局部积水或水分匮乏的情况，为水泥水化反应创设均衡适配的环境，促成胶凝产物均匀析出并紧密包覆骨料表层，增强颗粒间的胶结效能，促使抗压强度稳步增长。

2.2 不同振动频率下强度形成的差异化影响

低频振动工况下，能量传导强度不足，难以促使

粗骨料完成充分运动，颗粒嵌锁状态疏松，孔隙占比偏大；加之水分易在局部区域聚集进而形成结构薄弱带，水化反应进程难以充分推进，最终致使水稳料整体密实度处于较低水平，抗压强度缺乏坚实基础。高频振动工况下则易诱发颗粒共振现象，致使粗细骨料出现离析问题，粗骨料集中区域的孔隙难以得到有效填充，细集料与水泥浆体富集区域的胶结性能偏弱^[2]。再者过度振动易对已生成的水化产物结构造成损伤，造成强度生成进程受到明显阻碍。唯有振动频率处于适宜区间内，方可实现颗粒嵌锁作用与水化反应进程的协同优化，为高强度水稳料的生成提供可靠保障。

2.3 振动频率影响强度形成的核心工程问题

现阶段核心症结聚焦于振动频率与水稳料物料特性的适配匹配度欠缺，多数施工作业情境下，未依据骨料级配、水泥掺量等物料特性差异调整频率参数，造成强度生成效果波动幅度显著。除此之外，振动频率对强度形成的调控过程存在滞后效应，振动作用中颗粒运动、水分迁移与水化反应的动态耦合作用机制尚未得到充分明晰，难以精准掌控频率调控的关键阈值。另一方面，振动能量在物料体系内部传导不均衡，边缘部位与中心部位的频率作用效果差异显著，造成局部强度离散现象，进一步放大了水稳料抗压强度未达标的隐患。

3 基于抗压强度提升的水稳料振动频率优化方法

3.1 基于物料特性的振动频率适配方法

振动频率的优化配置需牢牢立足水稳料物料特性核心，实现频率参数与骨料级配、水泥掺量等关键指标的精准适配。结合骨料级配的差异化特征，粗骨料占比偏高工况下，因粗骨料粒径偏大、颗粒间摩擦力较强，宜采用稍高频率的振动参数，借助提升振动力能传导效率，带动粗骨料挣脱颗粒间约束完成规整排布，形成致密的颗粒骨架雏形，规避因颗粒嵌锁不密实引发的强度短板；细骨料占比较高时，细料颗粒轻质易扰动，需适度下调振动频率，遏制高频振动诱发的细料离析分层现象，同时兼顾水泥浆体与细骨料的充分裹覆结合^[3]。关联水泥掺量差异，掺量偏高的水稳料水化反应更为剧烈，需匹配中等频率区间，既可为水化反应创设稳定的能量环境，促成胶凝产物均匀生成，亦能规避高频振动对早期水化产物结构的破坏；掺量偏低时胶结作用相对薄弱，需借助适度提升频率强化颗粒嵌锁效应，填补胶结作用的不足，搭建稳定可靠的骨架承载体系。

3.2 基于强度形成过程的振动频率精准调控方法

衔接水稳料抗压强度形成的阶段性演化特征，推行适配性更强的分阶段振动频率调控模式，实现颗粒密实度提升与水化反应充分进行的协同优化目标。振

动初期的颗粒排布阶段，核心目标是快速构建骨架雏形，故选用略高初始频率，借助较强振动力能快速破除物料初始松散状态，带动骨料颗粒高效完成初步嵌锁，为后续深度密实进程筑牢基础；转入中期密实与水化协同阶段时，需精准切换至适配的最优频率并维持稳定，该阶段是强度形成关键期，振动力能需穿透至物料深层，推动孔隙逐步填充的同时兼顾水分均匀分布，为水泥水化反应创设均衡的温湿度条件，促成胶凝产物与骨料表层紧密裹结合；后期结构稳定阶段，为避免扰动已成型骨架与水化产物，需逐步下调振动频率，减轻对强度固化过程的干扰，促成强度稳步提升并定型。调控全程以物料密实度、水化反应进程等关键指标为核心参照，动态修正频率参数，保障强度形成全周期的精准管控。

3.3 振动频率优化的施工辅助保障方法

为使优化后的振动频率充分发挥效能，需配套构建完备的施工辅助措施，从设备、工艺、局部区域三个维度提升频率调控的有效性与稳定性。设备参数适配环节，结合优化后的频率参数，针对性调校振动碾的激振力、振幅等关联参数，确保激振力与振幅与频率形成互补效应，构建频率与激振力的协同匹配体系，保障振动能量高效传导至水稳料深层，规避表层密实而内部松散的分层问题。施工工艺配合环节，严格把控水稳料布料厚度，该参数需结合振动影响深度的现场试验数据确定，保障其与优化频率下的作用深度精准适配；同时结合现场碾压实验科学规划碾压遍数，规避因碾压不足导致频率调控效果未充分发挥，或碾压过度破坏强度结构的情况^[4]。针对边缘区域能量衰减幅度高于中心区域的痛点，运用边缘加密碾压、调整碾轮角度等辅助手段，保障边缘区域与中心区域的强度均匀性，全面提升水稳料整体抗压性能。见图1所示：



图1 水稳料振动频率优化方法

4 振动频率优化对水稳料抗压强度提升的实践成效

4.1 水稳料抗压强度核心指标显著提升

振动频率优化方法的落地应用,达成水稳料抗压强度的精准强化,且可适配不同物料特性的水稳料类型。针对粗骨料占比较高的水稳料,优化后的高频参数可带动粗骨料挣脱摩擦力束缚,完成规整嵌锁排布,构筑致密稳定的骨架结构;对比传统经验频率施工的水稳料,其抗压强度实现显著强化,同步加快早期强度发展节奏,缩短养护阶段的强度成型周期。细骨料含量偏高的水稳料经低频优化调控后,成功规避细料离析隐患,水泥浆体与细骨料充分结合,胶结效能得以充分释放,抗压强度稳定性显著优化,解决传统施工中因频率适配不当引发的局部强度薄弱问题。除此之外,分阶段式频率调控模式的应用,使水稳料强度形成全过程得到精准管控,后期强度持续增长潜能增强,为道路基层长期承载需求提供可靠强度保障。

4.2 水稳料强度均匀性与结构稳定性改善

振动频率优化方案搭配施工辅助保障措施,从能量传导均匀性与结构成型质量双维度出发,成功破解传统施工中因振动能量传导不均衡引发的强度离散难题,水稳料整体强度均匀性得到明显改善。工程实操过程中,优化后的振动频率与激振力、振幅构建起协同匹配体系,振动力能可高效穿透至水稳料深层,突破传统施工仅表层压实的局限,彻底规避表层密实而内部松散的分层缺陷,基层不同深度区域的强度差异由此显著缩减。针对边缘区域振动能量衰减难题,依托边缘加密碾压等辅助手段,可针对性弥补边缘压实能量损耗,促使边缘与中心区域强度逐步趋于均衡,有效降低因局部强度不足诱发的开裂、沉陷等病害隐患[5]。再者,优化频率作用下形成的水稳料结构,骨

料颗粒嵌锁更紧密,胶凝产物分布更均匀,骨架嵌锁与胶结作用的协同效能更强,抗形变性能与结构稳定性同步增强;在行车循环荷载作用下,强度衰减节奏放缓,有效抵御疲劳损伤,显著延长道路基层的服役年限。

5 结语

本文聚焦振动频率对水稳料抗压强度形成的作用开展系统探究,阐明了振动频率通过支配颗粒嵌锁、水分赋存及水化反应影响强度生成的内在机制,梳理明晰了不同频率下强度形成的差异化特征及核心工程症结。立足上述研究提出的基于物料特性适配、强度形成过程调控及施工辅助保障的振动频率优化方法,经工程实操验证能够显著强化水稳料抗压强度与均匀性,提升结构稳固性,同时彰显出可观的工程综合效益。本文研究成果为道路工程水稳料施工工艺优化提供理论依据与实操技术指引。后续可进一步深入推进振动频率与不同物料参数的耦合适配规律研究,拓展该优化方案在复杂地质与气候工况下的适用场景,助力实现道路工程基层施工质量的精准提质与长效保障。

参考文献:

- [1] 赵超.碎屑岩弃渣水稳料强度特征及其长期稳定性研究[D].四川大学,2023.
- [2] 姚夫森.碎屑岩水稳料综合利用技术研究[J].绿色科技,2025,27(06):246-252.
- [3] 李维.再生水稳料在市政道路改造中的应用[J].价值工程,2024,43(14):129-132.
- [4] 余成厚,孙建伟.基于公路路面耐久性提升的水泥稳定粒料基层振动成型施工技术[J].大众标准化,2025,(07):39-41.