

哈密山区道路工程砂砾填料颗粒组成与压实稳定性的关联研究

赵映勇

哈密赤诚公路试验检测有限责任公司

DOI:10.32629/pe.v4i2.20002

[摘要] 哈密山区道路工程中所采用的砂砾填料,其颗粒组成受母岩风化方式、地表干湿循环与地形扰动的共同塑造,表现出级配差异明显、细料含量波动较大的特征,由此压实过程的密实度增长路径、含水量的敏感范围以及骨架结构的稳定性便随之呈现出地区性规律;依托试验段实测数据,对天然砂砾的颗粒级配、松铺系数、含水量衰减与压实遍数之间的关联进行分析,可见粗细颗粒的搭配程度主导了干密度上升的节奏,而含水量稍高于最佳值的控制策略又使骨架重排更加顺畅,进而使压实稳定性得到保障并促成力学性能的整体提升。

[关键词] 哈密山区; 砂砾填料; 颗粒组成; 压实稳定性; 含水量; 松铺系数

中图分类号: TU472.2+1 **文献标识码:** A

Study on the Correlation Between Gravel Filler Particle Composition and Compaction Stability in Hami Mountain Road Engineering

Yingyong Zhao

Hami Chicheng Highway Testing Co., Ltd.

[Abstract] In the road engineering of the Hami Mountain area, the gravel fill material exhibits distinct gradation differences and significant fluctuations in fine material content, shaped by the combined effects of parent rock weathering modes, surface wet-dry cycles, and topographic disturbances. Consequently, the compaction process displays regional patterns in density growth trajectories, moisture sensitivity ranges, and skeletal structure stability. Based on field test data, an analysis of the relationships among particle gradation, loose-layer coefficient, moisture attenuation, and compaction passes for natural gravel reveals that the coarse-fine particle coordination governs the rate of dry density increase. Meanwhile, a control strategy slightly exceeding the optimal moisture content facilitates smoother skeletal rearrangement, thereby ensuring compaction stability and promoting overall improvement in mechanical performance.

[Key words] Hami Mountain Area; Gravel Filler; Particle Composition; Compaction Stability; Moisture Content; loose laying coefficient

引言

在哈密南坡山区,地形起伏与干旱气候交织而成的特殊环境,使砂砾填料在道路工程中呈现出明显的区域性特征,母岩风化强烈、颗粒形态粗糙且级配差异显著,砂砾在被开采、堆放与运输的过程中又不断发生细料流失或局部离析,致使骨架结构的稳定程度与压实潜力均难以简单以常规经验判断;山区施工受运距、温度与含水量衰减速度的制约,砂砾在铺设与碾压阶段的状态更为敏感,若控制不当便可能导致压实不足、沉陷增大或结构松散,从而影响道路服役质量,因此,砂砾颗粒组成与压实行为之间的关系,在此类地貌条件下显得尤为关键,亦成为理解材料性能与施工参数之间互动规律的重要切入点。

1 哈密山区道路工程砂砾填料颗粒特性及工程适用性分析

1.1 砂砾材料颗粒组成特征与母岩属性分析

在哈密南坡山区,砂砾填料的颗粒组成往往呈现出受母岩风化强烈影响的区域性特征,粗颗粒骨架明显、细料含量偏低,自然含水量又常不足以支撑颗粒重排,而干燥气候使这种状态更为突出^[1];风化后的颗粒形态多具棱角,其表面粗糙度在一定程度上强化了嵌挤结构,使砂砾在受压时能够形成较为稳固的传力路径,但级配波动较大将使孔隙结构趋于不均,致使压实潜能出现差异。试验段实测显示天然含水量仅0.5%,最大干密度可达2.30g/cm³,而5.0%的最佳含水量则提示颗粒润滑与骨架构建之间仍需适度水分调节,由此砂砾材料的物理属性与压实反应便呈现出一体化特征。

1.2 颗粒组成对工程构造性指标的影响规律

砂砾填料在构建路基结构时,其颗粒级配的连续性与细料比例的适度调节,决定了骨架能否稳固成型,空隙是否能够被有效填补,结构是否具备长期稳定所需的咬合作用;粗细颗粒搭配合理时,砂砾层内部的孔隙率降低,力链结构更加完整,使压实阶段的密实化更为迅速,而含水量在骨架重排中的协调作用也随之增强。试验段松铺系数平均值1.23揭示了砂砾在摊铺到压实之间的体积收缩特征,与级配的适宜性存在稳定对应关系,当颗粒组成保持均衡且含水量控制得当时,压实层的厚度、密实度与承载性能便可形成良性耦合,为山区道路的结构稳定奠定基础。

2 砂砾颗粒组成对压实特性与力学响应的机理

2.1 颗粒级配与含水量共同作用下的压实行为分析

砂砾填料在压实过程中所表现出的密实化规律,很大程度上受颗粒级配与含水量协同作用的主导,而在哈密南坡地区这种特征更加鲜明,因气候干旱、昼夜温差大、蒸发强烈,使砂砾从摊铺到碾压的含水量变化通常快于常规地区;试验段检测的含水量由5.5%逐渐下降至5.0%,与压实度从93.8%提升至97.7%的过程相互吻合,显示在最佳含水量附近形成的润滑膜与“骨架—填隙”体系发生了协调的微观重排,颗粒间嵌挤力得到增强,内部空隙随碾压遍数的累积而逐步收缩,压实曲线呈现出稳定而上升的趋势^[2]。砂砾级配越接近连续,粗细颗粒之间的搭接越充分,骨架越趋完整,而含水量的合理调控又使颗粒的滑移、转动与嵌挤过程更顺畅,密实度增长的节奏随之加快;在天然含水量仅0.5%的情况下,若不在摊铺前及时补水,砂砾极易呈现“干骨架”的松散状态,压实能量难以有效转化为结构重排的动力,试验段在施工含水量调高至最佳值以上约1%的策略,使骨架构建更易达成稳定形态。

2.2 压实机械、碾压遍数与颗粒结构稳定性的耦合效应

砂砾填料的力学响应不仅受颗粒组成的制约,也与压实机械的功率特性、碾压顺序与累计遍数密切相关,而在哈密试验段的验证中,这种耦合关系表现得尤为清晰:静压2遍、振压3遍、静压收光1遍的组合,使密实度在不同阶段呈现“逐步增强—快速提升—稳定收束”的节奏,粗粒的骨架在前两遍静压中被迫调整位置,使未嵌合的颗粒重新进入合理排列,而振动压实阶段的能量输入则使细颗粒向孔隙内部迁移,使结构迅速重排并形成更紧密的受力网络。随着碾压速度由1.7 km/h、2.0 km/h逐渐提升至3.0 km/h,压实能量的传递精度与幅度相互匹配,粗颗粒之间的咬合作用不断增强,最终形成均匀稳定的骨架体系;试验段采用22 t振动压路机配合分段速度控制,使压实过程中的离析风险减少,粗细料的空间再分布更加均衡,压实度得以保持稳定增长。振动能量过弱时难以驱动颗粒深入重排,过强时又易导致局部破碎、细料增加、级配变化,因此试验段形成的6遍碾压制度,恰是一种适应砂砾颗粒组成与山区环境双重条件的平衡结果,既避免破碎导致的性能衰减,又使结构稳定性在反复激振下得到巩固,由此显现出机械能量与颗粒结构之间的高度耦合特征。

2.3 压实状态对材料强度与稳定性的控制作用

砂砾层压实质量的优劣,直接决定了路基在荷载作用下的力学表现,而压实状态所形成的稳定骨架结构,又是保持长期耐久性的重要基础;当密实度达到97%以上时,颗粒间力链分布更加均衡,路基能够更有效地承受交通荷载并减少非均匀沉降的风险,而含水量与级配的协同控制使这一骨架结构更具持续稳定性。试验段在侧向区域增加1~2遍振压,使边部密实度显著提高,这一措施强化了路基顶层与边坡之间的协调作用,减少了山区道路常见的边坡松散与局部沉降问题;粒间的嵌挤性越强,强度的增长越明显,而压实状态良好时颗粒之间的摩阻力、咬合作用以及抗剪性能都会显著提升,路基在温度变形、干湿循环等外界扰动下表现出更好的稳定性。由于山区道路受风化剥蚀、降雨冲刷与冻融循环影响较大,压实状态不佳时容易出现松散、坑槽或局部塌陷,而当颗粒组成合理、含水量控制得当、碾压能量传递充分时,砂砾路基能够形成致密稳固的整体结构,使变形趋势收敛,结构抵抗能力增强。由此可见,压实状态并非单一指标的体现,而是颗粒级配、机械能量、含水动态与施工组织多重因素叠加后的综合反映,其对材料强度与道路稳定性的影响贯穿施工全过程,并在道路服役周期内持续发挥关键作用^[3]。

3 基于颗粒组成优化的砂砾填料压实控制与稳定性提升策略

3.1 颗粒级配优化与现场填料组织模式

砂砾材料在山区道路工程中的表现,很大程度上依托颗粒级配的连续性与细料含量的适宜区间,而哈密试验段的施工经验表明,天然砂砾虽具有强度高、来源广的优势,其内部颗粒组成却因风化、堆置方式与运输扰动而易出现离析,使骨架结构的完整性受影响,因此在填料组织模式上构建起稳定的级配体系尤显重要。若颗粒间搭接关系匀整,粗粒支撑体系便能稳固延展,而细粒的适量存在又能填补孔隙、抑制大颗粒滑移,使压实阶段的密实化过程更为顺畅;这一规律在试验段松铺系数平均值1.23的反映下显得愈加明确,因为松铺厚度的收敛速度——实测厚度由粗平阶段的约24.9cm收束至成型后的目标厚度——正印证了颗粒内部空隙的可控性与级配合理性的匹配。

在现场组织上,试验段采用以摊铺方格控制卸料量的方式,使每车20m³的砂砾在7.8m的摊铺长度范围内得到均匀分布,配以装载机推平和人工顺料,显著降低了离析概率;这种做法不仅稳定了砂砾的骨架结构,也为后续碾压中的颗粒重排创造了更为均一的初始条件。随着摊铺完成,含水量补给根据最佳含水量5.0%的参考值适度提高1%,使砂砾呈现更好的润滑状态,使本就具备强度优势的粗粒骨架得以在振动压实中迅速稳定,由此颗粒级配、含水状态与摊铺组织方式三者之间的协同作用便构成了压实质量提升的基础。

3.2 压实工艺参数控制与施工过程的稳定性强化

砂砾压实行为的稳定性往往寄托于合适的工艺参数,而振动能级、碾压速度、碾压遍数及施工含水量之间的协调,更是关系压实度能否达到97%以上要求的关键环节;试验段的施工数据

在结构上验证了这种多参量协同机制的有效性。静压阶段的两遍碾压,使砂砾层内部潜在的不平整得以显现,骨架结构初步压实,振压阶段的三遍加载则在振幅与频率共同作用下,使粗粒间的嵌挤关系逐步稳固,细粒进入残余孔隙,最终形成稳定的受力体系;而静压收光的最后一遍,又使表层细料分布更加均匀,并使整体结构在较低能级下进一步紧密,从而保证长期稳定性。

碾压速度的节奏同样与颗粒响应密切相关,在1.7km/h的静压状态下,颗粒主要完成定位;在2.0-2.5km/h的振压阶段,骨架结构的重排最为剧烈;当速度提升至3.0km/h左右时,振动力更适合填隙与修正孔隙结构,如此层层推进,使砂砾层的密实化呈现出极富逻辑性的节奏变化。为进一步说明压实参数与含水量的相关性,可将试验段的压实度-含水量变化趋势总结如下(见表1),其变化路径清晰地展现了含水量对压实效果的影响程度。

表1 试验段不同含水量条件下的压实度变化趋势(节选自现场实测数据)

压实遍数	平均含水量(%)	平均压实度(%)
振压第二遍	5.5	93.8
振压第三遍	5.3	95.5
振压第四遍	5.0	97.7

表1所呈现的变化路径显示,含水量与压实度之间并非简单线性关系,而是依托颗粒重排、孔隙压缩和骨架成型三种机制叠加后的综合反映;含水量略高于最佳时压实效果更佳,而随着含水量逐渐逼近最佳值,骨架最终稳定化的速度明显提升,压实度跨越97%的节点也在这一区间实现。

试验段施工同样证明了设备配置与施工长度之间的平衡意义,以22T振动压路机两台、洒水车两辆和平地机一台为主体的机械组合,与400m的每日施工能力相匹配,使各环节衔接紧凑,不产生压实延误或含水量突降的风险;这种组织模式不仅提升了压实质量,也提高了山区施工的效率与可控性。

3.3 长期稳定性视角下的结构强化策略与工程意义

砂砾层的稳定性不仅体现在施工阶段的压实度与密实水平,也体现在道路长期服役条件下的结构保持能力,而该能力的核心便是骨架结构在温差、荷载与水分扰动下的持续稳定性^[4];山区道路纵坡大、径流集中、冻融循环频繁,砂砾层若在结构上稍

显薄弱,便会在局部区域出现下沉、松散或边部软化等现象,因此在压实完成后对结构边界、表层组织与排水能力进行强化尤为重要。

试验段在达到规范压实度后,对路基顶部进行额外振压1-2遍,使侧向稳定性增强,这是对山区道路特殊工况的积极回应;同时在收光阶段以低速静压稳定表层,使粗粒得以重新调整姿态,使细料均匀分布于缝隙之中,结构整体呈现更高的一致性,与密实度,而这种一致性往往与道路后期抗变形能力紧密相关。

从更宏观的角度来看,颗粒级配稳定、骨架结构完整、压实过程有序,是山区道路抵御荷载冲击与气候变化的重要基础,而试验段在组织方式、机械节奏与参数选择上的经验,使砂砾填料能够在结构上实现均质性与稳健性,为未来大规模施工提供依据,使山区道路工程在性能稳定性与运行寿命上获得更高保障。

4 结语

在颗粒组成、含水状态与压实机理彼此交织的体系中,砂砾填料所呈现出的结构潜能被不断激活,骨架稳固、孔隙可控、韧性增强的特征愈趋显著。而这种由材料属性延伸至工程性能的递进关系,又因施工组织、工艺节奏与边界稳定措施的协同而更加丰满,使山区道路在面对荷载扰动、气候变化与长期服役需求时具备更强的适应力。哈密试验段中所体现的级配控制、含水调节与压实节奏的精细化取向,为复杂地形下的砂砾路基提供了可持续发展的实践依据,也使材料与结构之间的耦合更具方向性,由此在保障工程质量的同时推动山区道路建设迈向更加稳健、更加可靠的技术路径。

[参考文献]

- [1]魏育青.市政道路路基压实度的检测方法分析及控制要点[J].散装水泥,2025,(06):248-250.
- [2]修维宁,魏朝富,张仕超,等.丘陵山区农村道路路基稳定性及影响因素研究[J].长江科学院院报,2010,27(11):33-39.
- [3]严其平.基于山区道路特殊路基的填方施工方法研究[J].江西建材,2023,(12):269-270+273.
- [4]王霆,翁念斌.浅析山区公路路基填方施工质量管控[J].中国住宅设施,2025,(06):244-245.

作者简介:

赵映勇(1987--),男,汉族,甘肃白银人,本科,工程师,主要研究方向:公路工程质量试验检测。