风积沙替代骨架密实型级配碎石细集料路用性能研究

周功甲

新疆塔里木建设投资集团新疆第一工程有限公司 新疆 阿拉尔 843300

【摘　要】：针对南疆库车、沙雅区域风积沙粒径集中于 0.075～0.6mm、缺少 0.6～4.75mm 中细颗粒，无法直接用于骨架密实型级配碎石基层的工程难题，依托库沙新拜片区市政道路骨架密实型级配碎石基层，提出保留粗骨料嵌挤骨架、仅在 0.075～4.75mm 细集料范围内进行风积沙等量置换的资源化利用方案。严格遵循骨架密实型级配碎石原材料技术要求，控制风积沙塑性指数与细料含量，限定 10%～22%细集料替代区间，采用石屑补足缺失粒级并重新标定混合料最佳含水率。通过室内重型击实试验、回弹模量试验、水稳定性试验及现场试验段弯沉检测系统评价改性混合料的路用性能。结果表明：在 15%～20%最优替代率下，改性级配碎石混合料压实性能稳定、浸水模量衰减小，合成级配落在骨架密实型级配碎石允许范围内；试验段基层交工验收弯沉代表值均小于交工验收弯沉值 LS=99.4（0.01mm），满足骨架密实型级配碎石基层交工验收技术标准。该方案可就地消纳本地风积沙，降低南疆荒漠道路细集料远距离外购成本，可为同类干旱地区骨架密实型柔性基层就地取材提供试验依据与工程参考。

【关键词】：风积沙；骨架密实型级配碎石；柔性基层；细集料替代；回弹模量；交工验收弯沉

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.071

引言

南疆塔里木盆地北缘库车、沙雅一带地处温带大陆性干旱气候区，荒漠广布，风积沙储量丰富、分布广泛、开采便利且运距短。然而，该区域风积沙颗粒组成单一，粒径大多集中在 0.075～0.6mm 区间，几乎不含 0.6～4.75mm 粒组，级配连续性差，与骨架密实型级配碎石的级配要求存在显著差异，长期以来难以直接作为道路基层集料使用。

骨架密实型级配碎石作为典型的柔性基层材料，依靠粗骨料颗粒间相互嵌挤形成受力骨架，细集料填充骨架空隙并改善整体密实度，具有强度高、变形协调能力强、抗反射裂缝性能优良等特点。该结构体系对集料压碎值、针片状颗粒含量、软弱颗粒含量、塑性指标、压实度及颗粒级配均有严格控制要求，其中细集料的级配连续性与塑性特性直接影响混合料的压实成型、水稳定性与长期力学性能。

当前国内对风积沙道路应用的研究多集中于水泥稳定类半刚性基层，主要依靠胶凝材料的胶结作用弥补风积沙级配缺陷；在纯柔性骨架密实型级配碎石体系下，风积沙作为细集料替换材料的相关研究较少。若未经改性直接将风积沙掺入骨架密实型级配碎石，易造成级配断档、细料局部富集、压实困难、水稳定性下降等问题，严重时甚至出现交工弯沉超标等工程病害。因此，本地风积沙长期难以在骨架密实型柔性基层中规模化应用，工程所需细集料不得不从远距离采购，运输成本高，工程造价偏高。

基于上述工程背景，本文以骨架密实型级配碎石原材料技术指标为底线，提出细集料内部等量替换、石屑补齐缺失粒级的改性方案，不添加胶凝材料、不改动粗骨料嵌挤骨架。通过室内试验与现场试验段检测相结合，系统评价不同风积沙替代率下混合料的级配特性、压实性能、力学性能、水稳定性及交工弯沉表现，确定最优替代区间，为南疆荒漠地区骨架密实型级配碎石基层利用风积沙提供试验依据与工程指导。

1 原材料技术要求与性能指标

1.1 骨架密实型级配碎石原材料技术规定

骨架密实型级配碎石的结构特征在于粗骨料形成嵌挤骨架、细集料填充空隙，二者协同工作以获得较高的承载能力与良好的变形特性。为保证结构性能，本研究所用骨架密实型级配碎石原材料应满足以下技术要求：

（a）轧制碎石可采用各类除软质岩石以外的其他岩石，碎石内不得含有黏土块、植物根叶、腐殖质等有害物质；

（b）碎石针片状颗粒总含量≤20%，以保证粗骨料的嵌挤效果与骨架稳定性；

（c）碎石应为多棱角块体，软弱颗粒含量＜5%，扁平细长碎石含量＜20%；

（d）集料压碎值≤26%，CBR 值满足设计要求，确保粗骨料具备足够的强度与耐磨性能；

（e）按照重型击实试验方法确定混合料最佳含水

率与最大干密度，现场压实度≥98%；

（f）骨架密实型级配碎石颗粒级配、液限、塑性指数应符合设计要求，其中细集料液限＜28%、塑性指数＜9。

试验检测执行《公路土工试验规程》JTG 3430-2020，施工与验收执行《公路路面基层施工技术细则》JTG/T F20-2026。

1.2 南疆风积沙基本特性

试验所用风积沙取自沙雅区荒漠地带，取样深度 0.3～0.5m，避开表层腐殖土与盐渍土富集区域。

颗粒分析结果表明：该区域风积沙颗粒集中分布在 0.075～0.6mm 区间，占总质量的 90%以上，几乎不含 0.6～4.75mm 粒组，级配曲线呈单峰特征，原生级配不连续。物理性能测试显示：风积沙塑性指数＜9，液限＜28，满足细集料液限与塑性指数控制要求；洁净度良好，无腐殖质、黏土团块等有害物质。风积沙颗粒表面光滑、呈次棱角状，比表面积较大，吸水性较强，这一特性直接影响混合料的最佳含水率与压实工艺。

综合来看，南疆风积沙在塑性指标与洁净度方面满足细集料技术要求，但原生级配缺失 0.6～4.75mm 中细颗粒，必须通过级配改性处理后方可应用。

1.3 轧制碎石与石屑

粗集料采用本地轧制石灰岩碎石，颗粒为多棱角块体，表面粗糙，嵌挤性能良好。实测主要技术指标为：集料压碎值 22.3%（≤26%），针片状含量 14.7%（≤20%），软弱颗粒含量 3.6%（＜5%），均满足原材料技术指标要求。

石屑作为补充细集料，粒径主要分布在 0.075～4.75mm 区间，其中 0.6～4.75mm 粒组含量较高，用于补齐风积沙缺失的中细颗粒，使改性后合成级配落在骨架密实型级配区间内。

2 试验方案设计

2.1 替换原则与机理

本研究采用细集料内部等量替换的改性方案，核心思路是在不改变粗骨料骨架结构的前提下，利用风积沙部分替代细集料中的石屑，同时通过调整石屑用量补齐缺失粒级，确保合成级配连续且落在规范允许范围内。具体替换原则如下：

（1）保留＞4.75mm 粗骨料比例不变，保证骨架密实结构的嵌挤受力体系不被破坏；

（2）仅在 0.075～4.75mm 细集料范围内采用风积沙等量替换石屑，替代率以细集料总质量为基准计算；

（3）合成级配必须落在骨架密实型级配碎石级配区间内，混合料液限＜28%、塑性指数＜9；

（4）现场压实度控制≥98%，以重型击实试验确定的最佳含水率与最大干密度为施工控制基准；

（5）以基层交工验收弯沉代表值小于交工验收弯沉值 LS=99.4（0.01mm）作为基层交工验收的核心控制指标。

该方案的改性机理在于：风积沙颗粒细小、比表面积大，可有效填充粗骨料与石屑形成的微小空隙，提高混合料密实度；石屑则提供 0.6～4.75mm 中细颗粒，保证级配曲线连续过渡，避免细料富集与级配断档。二者协同作用，在不添加胶凝材料的条件下实现混合料路用性能的稳定。

2.2 试验分组

为系统评价风积沙替代率对混合料路用性能的影响，设置以下三组试验：

对照组：常规骨架密实型级配碎石，细集料全部采用石屑，风积沙替代率为 0；

试验组 1：细集料风积沙替代率 15%，即在 0.075～4.75mm 细集料中，15%质量由风积沙替代，其余 85%由石屑组成；

试验组 2：细集料风积沙替代率 20%，即风积沙占细集料总质量的 20%，石屑占 80%。

三组混合料的粗骨料级配与用量完全一致，仅细集料组成不同，以保证试验结果的可比性。

2.3 试验项目与方法

室内试验包括：重型击实试验（确定最佳含水率与最大干密度）、颗粒筛分试验（验证合成级配）、液塑限试验（控制细集料塑性指标）、回弹模量试验（评价力学性能）、浸水稳定性试验（以浸水残留模量比表征水稳性能）。

现场试验段检测包括：压实度检测（灌砂法，控制标准≥98%）、贝克曼梁弯沉检测（检测基层顶面回弹弯沉，控制值 LS=99.4（0.01mm））。

3 试验结果与分析

3.1 合成级配与细集料指标

经过风积沙替换及石屑补粒级后，15%与 20%两组试验混合料的合成级配全部落在骨架密实型级配碎石级配区间内，级配曲线连续光滑，无明显断档或突

跃。混合料液限＜28%，塑性指数＜9，满足原材料技术要求。

原生风积沙缺少 0.6～4.75mm 颗粒，若直接替代石屑将导致该粒组缺失、级配曲线出现断档。本方案通过石屑补齐该粒组后，0.075～4.75mm 范围内各筛孔通过率连续过渡，细集料内部形成合理的颗粒嵌套结构，既发挥风积沙填充微小空隙的作用，又保证中细颗粒的骨架支撑功能，不会破坏粗骨料的骨架嵌挤作用。

3.2 压实特性

采用重型击实方法对三组混合料开展击实试验，结果如表 1 所示。

表 1 各组混合料击实试验结果

组别	风积沙替代率/%	最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm³)
对照组	0	5.8	2.26
试验组 1	15	6.3	2.24
试验组 2	20	6.7	2.22

由表 1 可知，随着风积沙替代率增加，混合料最佳含水率呈小幅上升趋势，最大干密度略有下降。对照组最佳含水率为 5.8%，最大干密度为 2.26g/cm³；15%替代组最佳含水率为 6.3%，最大干密度为 2.24g/cm³；20%替代组最佳含水率为 6.7%，最大干密度为 2.22g/cm³。

这一变化规律的主要原因在于风积沙颗粒细小、比表面积大，表面吸附水膜所需水量增加，导致最佳含水率上升；同时，风积沙颗粒密度略低于石屑，细颗粒比例增加使混合料颗粒间摩擦阻力增大，压实过程中颗粒重排难度略有提高，导致最大干密度小幅下降。

现场碾压控制压实度≥98%，三组混合料在相应最佳含水率条件下均可达到压实度要求，说明 15%～20%替代率范围内混合料压实性能稳定可控。施工时需根据各替代率对应的最佳含水率调整洒水量，确保碾压时混合料含水率处于最佳含水率±1%范围内。

当替代率超过 22%时，细料总量偏高，粗骨料骨架空隙被过度填充，骨架嵌挤效果削弱，压实性能明显下降，因此将 22%作为替代率安全上限。

3.3 回弹模量与水稳定性

回弹模量是评价级配碎石基层力学性能的核心指标，反映混合料在荷载作用下抵抗弹性变形的能力。试验结果表明：15%、20%替代率下，混合料回弹模量与对照组接近，差异在 5%以内，说明在合成级配满足骨架密实要求的前提下，细集料替换对混合料整体力学性能影响有限。

水稳定性通过浸水残留模量比评价。15%、20%替代率下混合料浸水残留模量比均大于 85%，水稳定性良好。这主要得益于风积沙本身洁净、塑性低，不含膨胀性黏土矿物，浸水后颗粒体积稳定；同时，石屑补齐中细粒组后级配连续，混合料内部空隙率低，水分渗入路径受限，进一步提高了水稳定性能。

3.4 交工弯沉结果

试验段采用贝克曼梁法检测基层顶面回弹弯沉，本项目骨架密实型级配碎石基层交工验收弯沉控制值为 LS=99.4（0.01mm）。检测结果显示：对照组实测代表弯沉为 42.6（0.01mm），15%替代组为 44.1（0.01mm），20%替代组为 45.8（0.01mm）。

各组实测代表弯沉均远小于验收限值 99.4（0.01mm），结构抗变形能力满足交工验收要求。随着风积沙替代率提高，代表弯沉呈小幅增大趋势，20%替代组较对照组增大 3.2（0.01mm），增幅约 7.5%，处于可控范围内。这一变化与最大干密度随替代率增加而小幅下降的规律一致，但不影响结构验收合格。

4 最优掺量确定

综合骨架密实级配范围、压实度≥98%、回弹模量、水稳定性及交工弯沉等各项指标，南疆库沙新片区骨架密实型级配碎石细集料风积沙最优替代区间确定为 15%～20%。

在该区间内，混合料满足全部原材料技术指标：集料压碎值≤26%、针片状≤20%、软弱颗粒＜5%、液限＜28%、塑性指数＜9，合成级配落在骨架密实区间内；现场压实度可达 98%以上；回弹模量与对照组接近，浸水残留模量比大于 85%；交工弯沉代表值小于 99.4（0.01mm），各项性能满足规范要求。

从资源利用角度分析：替代率低于 15%时风积沙消纳量不足；高于 20%时性能衰减明显且接近 22%安全上限，施工管控难度加大。因此，15%～20%是兼顾路用性能与资源利用效益的最优区间。

5 施工技术要点

为保证风积沙改性骨架密实型级配碎石基层的施工质量，结合室内试验结果与现场试验段实践，提出以下施工技术要点：

（1）原材料进场检验：轧制碎石不得含有黏土块、腐殖质、植物根叶等有害物质，逐批检测压碎值、针

片状含量、软弱颗粒含量；风积沙进场时检测液限与塑性指数，塑性指数必须＜9，严禁使用塑性超标或含黏土团块的风积沙。

（2）配合比设计：按照骨架密实型级配范围设计合成级配，利用石屑补齐 0.6～4.75mm 缺失粒组，确保各筛孔通过率落在级配区间内；根据风积沙替代率重新标定混合料最佳含水率与最大干密度。

（3）压实控制：现场采用重型击实标准，压实度≥98%；碾压时混合料含水率应控制在最佳含水率±1%范围内，根据天气情况与运输距离适当调整洒水量。

（4）拌和与碾压：拌和时先干拌均匀后洒水，确保含水率均匀一致；碾压采用先静压后弱振的组合工艺，避免强振或过振造成细料上浮与离析；碾压过程中及时检测压实度，不合格部位及时补压。

（5）验收控制：成型后按规范要求开展弯沉检测，交工验收弯沉代表值不大于 99.4（0.01mm）。

6 结论

（1）南疆库沙新片区风积沙颗粒组成单一，缺少 0.6～4.75mm 粒组，原生级配不连续，但液限与塑性指数满足骨架密实型级配碎石细集料控制指标，洁净度良好，可通过细集料内部等量替换及石屑补粒级的方式改性利用。

（2）改性混合料各项原材料指标满足骨架密实型级配碎石技术要求：集料压碎值≤26%，针片状含量≤20%，软弱颗粒含量＜5%，液限＜28%，塑性指数＜9，合成级配落在规范区间内，现场压实度≥98%。

（3）15%～20%为最优细集料替代区间，该区间内改性混合料力学性能与水稳定性良好，回弹模量与对照组接近，浸水残留模量比大于 85%；试验段交工弯沉代表值小于 99.4（0.01mm），满足交工验收标准。

（4）该方案不添加胶凝材料、不改动粗骨料骨架，工艺简单，可就地消纳风积沙，减少外购砂石料运输成本，适合南疆荒漠地区骨架密实型柔性基层工程推广应用，也可为同类干旱地区道路基层就地取材提供参考。

参考文献：

[1] 交通运输部.JTG/T F20-2026 公路路面基层施工技术细则[S].北京:人民交通出版社,2026.

[2] 交通运输部.JTG 3430-2020 公路土工试验规程[S].北京:人民交通出版社,2020.

[3] 刘杰.风积沙稳定碎石基层路用性能研究[J].中国公路学报,2025.

[4] 包建强,邢永明.风积沙基本力学性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2024.

[5] 刘振正.细集料对级配碎石回弹模量的影响研究[J].兰州交通大学学报,2026.