不同粒径级配碎石在风电场道路基层中的力学行为研究

李宜远[1]，王登科[1]，乔杨桃[2]，白　靖[2]，魏靖华[1]

（1. 中国电建集团山东电力建设第一工程有限公司，山东 济南 250102；
2. 陕西华电新能源发电有限公司，陕西 西安 719400）

摘　要　针对风电场道路需承担大型运输设备重载碾压、沿线地质条件复杂，现有无结合料碎石基层普遍存在级配设计不合理、承载稳定性不足的工程痛点，本文依托某典型风电场道路工程，系统开展不同粒径级配碎石在无结合料基层结构中的力学行为研究。设计三种符合现行规范要求的典型粒径级配方案，通过开展击实试验、CBR强度试验与回弹模量试验，系统分析材料在压实性、抗剪强度及弹性响应等方面的表现。试验结果表明：粒径级配结构显著影响基层性能，合理提升细颗粒比例可优化结构密实性与承载稳定性。研究成果可为复杂地质与重载交通条件风电场下道路基层材料的优化设计提供参考。

关键词　风电场道路；级配碎石；CBR强度；回弹模量

中图分类号：U416.214；TU521.2　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.006

0　引言

风电场道路作为大型设备运输与运维通道，常处于大轴载、高通频、昼夜温差大及冻融交替等极端服役环境中，基层结构易发生沉陷、开裂与脱稳破坏，严重制约道路的耐久性与服务能力。无结合料级配碎石结构因施工简便与力学稳定性良好，在风电场道路建设中得到广泛应用[1]。其性能显著受粒径分布、级配连续性与填隙颗粒比例控制等因素影响，直接决定结构的密实性、强度储备与长期弹性响应特性。现有研究主要针对常规道路荷载与均质土层环境，鲜见聚焦地质条件剧烈变化区与周期性湿—冻耦合作用下材料的力学适应性评估[2-3]。本文基于典型丘陵—沙质地貌区某风电道路工程，系统揭示粒径分布对基层力学性能的影响机制，旨在明确适用于复杂气候地质环境下的优选级配组合，为风电场道路基层材料设计与参数选取提供工程依据。

1　案例工程概况

案例工程位于微丘—重丘过渡地形的沙质覆盖区，地形波动明显，地表覆盖以碎石、砂砾及风积细颗粒物为主，地基土层不均匀，局部存在软弱夹层。道路总长度约12.4 km，路面宽度为6.5 m，服务于风电设备运输及后续维护作业，运行车辆以重型平板车和维修车辆为主。道路基层设计厚度约为0.42 m，采用无结合料级配碎石结构，施工单位要求其在长期荷载与反复气候变化条件下具备较高稳定性。实测通行车辆最大单轴载荷约148.6 kN，路面受力状态复杂。区域年平均气温约为7.6 ℃，最低气温接近-23.4 ℃，年均冻融循环次数约为39次，地下水位埋深变幅在1.7 m～2.4 m之间，存在周期性湿化影响。

2　碎石原材试验方案设计

2.1　原材料基础性能检测

所用碎石原材源自施工现场北侧4.7 km处指定采区，岩性为中等风化花岗岩，呈灰褐色，硬度高，结构致密，无裂隙。通过压碎值试验，测得其压碎值为19.6%，抗压稳定性满足重载交通需求。对原材进行筛分分析，粒径控制在0 mm～37.5 mm，颗粒组成中5 mm～20 mm占比42.8%，20 mm～31.5 mm占比33.4%，细料组分控制在规范要求范围内，整体粒径分布连续，粒形近立方体。天然含水率为1.8%，干密度2.63 g/cm^3，表观密度2.71 g/cm^3，孔隙率13.6%，材料结构紧凑。针片状颗粒含量控制在10.3%，未出现棱角破碎或表面风化现象。

作者简介：李宜远（1971-），男，专科，工程师，研究方向：风电场道路工程。

2.2 级配方案设计

为评估粒径组成对无结合料基层结构性能的影响，基于现场原材粒径特征，设计三种级配方案，控制最大粒径为 37.5 mm，细颗粒下限为 0 mm，粗颗粒、骨料间充填颗粒及填隙颗粒比例分别调整，形成典型骨架—嵌挤结构、密实结构及填隙型结构分布[4]。在试验级配中，粗颗粒定义为 26.5 mm～37.5 mm，中颗粒为 9.5 mm～26.5 mm，细颗粒为 0 mm～9.5 mm，三组试验级配组成比例如表 1 所示。

表 1 不同级配方案设计组成比例

级配方案	粗颗粒（26.5 mm～37.5 mm）/%	中颗粒（9.5 mm～26.5 mm）/%	细颗粒（0 mm～9.5 mm）/%
A 组	50.2	36.1	13.7
B 组	42.3	39.8	17.9
C 组	34.6	41.2	24.2

A 组粗颗粒占比超过 50%，形成以嵌挤为主的承载结构，颗粒间空隙多依赖中细颗粒填充，结构骨架明显。B 组粗中颗粒比例接近，力学联锁性与填隙性协调。C 组细颗粒占比增至＞24%后，粗颗粒直接接触数量减少。细料分布在受力路径中，会把原先由粗颗粒主导的力链切分开，骨架效应随之变弱，基质填充作用更加明显；压实后孔隙率较低，混合料整体偏向密实型结构，适宜在高密实度指标下运用，但对基层抗剪承载的贡献有所下降。

2.3 试验方法设计

为系统评估不同粒径级配碎石在道路基层中的变形与强度响应性能，试验设置击实特性、承载能力和回弹模量三类核心指标，依据《公路土工试验规程》（JTG 3430-2020）执行。击实试验采用重型击实法，施加能量为 2 700 kJ/m^3，利用标准直筒模具分三层装填，每层击打 25 次。试样含水率设定为 3%～9%，每间隔 1.5% 设定一点，测得干密度与含水率关系曲线，确定最大干密度与最佳含水率。CBR 试验采用饱水加载法，试样压实成型后静置 24 h，再于 20±2 ℃条件下浸水 96 h 至近饱和状态，贯入速率 1.0 mm/min，加载至 2.54 mm 与 5.08 mm 分别记录承载力，取较小者为代表 CBR 强度值。贯入过程中记录膨胀高度，计算浸水膨胀率，用于表征水稳性与体变控制能力。

回弹模量试验采用室内恒温恒湿条件（20±2 ℃，60%～70%）下进行，试样尺寸为 Φ150 mm×150 mm，按最大干密度及最佳含水率击实成型。加载方式采用五级轴向静载分级加载，应力上限为 400 kPa，加载比为 1.0。轴向弹性变形由高精度 LVDT 位移计实时采集，回弹模量计算公式如下：

$$E=\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

式（1）中，E 为回弹模量（MPa），$\Delta\sigma$ 为两级加载应力差（MPa），$\Delta\varepsilon$ 为相应轴向应变差[5]。试验数据经多组统计取平均值，确保指标代表性与稳定性，为后续性能分析提供基础支撑。所有操作均在室内控制条件下完成，试验温度保持在 20±2 ℃，相对湿度 60%～70%。

3 不同粒径级配对材料试验结果与分析

3.1 击实特性分析

为分析不同粒径级配对材料压实性能的影响，采用重型击实法对 A 组、B 组、C 组三种级配方案进行试验，获取干密度与含水率关系曲线，明确最佳含水率与最大干密度。各组试样经标准模具分层击实，控制击实能量为 2 700 kJ/m^3，试验温度为 20±2 ℃，含水率调控范围为 3%～9%，每隔 1.5% 取一点，保证测试数据密度与稳定性。各组试样击实曲线如图 1 所示。

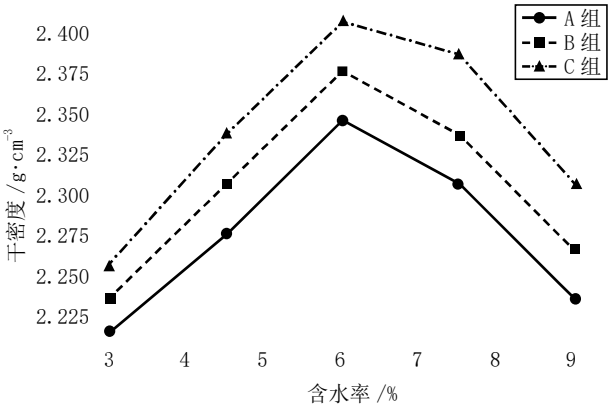


图 1 各级配方案击实曲线对比图

试验结果表明，不同级配结构在压实过程中展现出显著差异。A 组以粗颗粒为主，颗粒间空隙率高，水分易排散，干密度达 2.35 g/cm^3，最佳含水率为 5.4%。B 组粗细颗粒协调，形成稳定支撑骨架与填隙结构，压实敏感性适中，干密度提升至 2.38 g/cm^3，最佳含水率为 6.2%。C 组细颗粒含量较高，填隙效果明显，材料体积压缩能力强，最大干密度升至 2.41 g/cm^3，但最佳含水率增至 7.2%。B 组级配在干密度提升与施工容错性之间取得平衡，更适用于风电场道路基层对均匀压实度与耐久性的双重要求。

3.2 CBR强度与浸水膨胀特性分析

为揭示不同粒径级配在饱水条件下的抗剪承载能力差异，采用重型击实参数制备标准试样，击实能量为2 700 kN·m/m^3，保持各组最佳含水率与最大干密度一致性。试样浸水96 h，加载贯入速率控制在1.0 mm/min，采用标准载荷板逐步施加垂直荷载，记录2.54 mm与5.08 mm贯入深度对应承载力，选取控制值计算CBR强度指标。测量试样轴向膨胀量，换算膨胀率，分析浸水致变形趋势与结构稳定性。不同级配构成对骨架闭合度与剪切破坏模式影响显著。试验测得的CBR强度与浸水膨胀率指标见表2。

表2 各级配方案CBR试验与膨胀率结果

级配方案	A组	B组	C组
最佳含水率/%	5.4	6.2	7.2
最大干密度/g·cm^{-3}	2.35	2.38	2.41
2.54 mm承载力/kN	6.82	7.54	8.12
5.08 mm承载力/kN	8.47	9.12	9.86
CBR值/%	82.3	89.6	95.7
膨胀率/%	0.182	0.147	0.121

结果表明，细颗粒含量从13.7%增加至24.2%时，CBR值由82.3%提升至95.7%，升幅达16.3%。同时，膨胀率从0.182%降至0.121%，说明填隙颗粒优化了饱水环境下的体变控制能力。B组在强度与膨胀率之间取得平衡，更契合基层长期服役的稳定性需求。上述规律可为风电场道路基层级配优化提供定量依据。

3.3 回弹模量响应分析

为评价不同粒径级配碎石在动态荷载作用下的弹性响应性能，采用等应力比加载方式开展回弹模量试验。试样尺寸为Φ150 mm×150 mm，依据各组最佳含水率与最大干密度分别击实成型，加载应力范围为100 kPa～400 kPa，按三级施加轴向静载，监测稳定后轴向回弹应变，计算各级荷载下的回弹模量。试验采用三轴室恒温控制在20±2 ℃，通过LVDT位移计精确采集微小变形，消除初始扰动误差。试验结果见图2。

A组粗骨架突出，但孔隙率高，局部剪切弱面产生微屈服，模量仅为185.3 MPa；B组细料填充充分，颗粒接触面密实，刚度及应力扩散路径最优，模量达202.6 MPa；C组细颗粒占比高，结构闭合度虽强，但内摩擦角减弱，易滑移，应变滞后，模量下降至191.4 MPa。

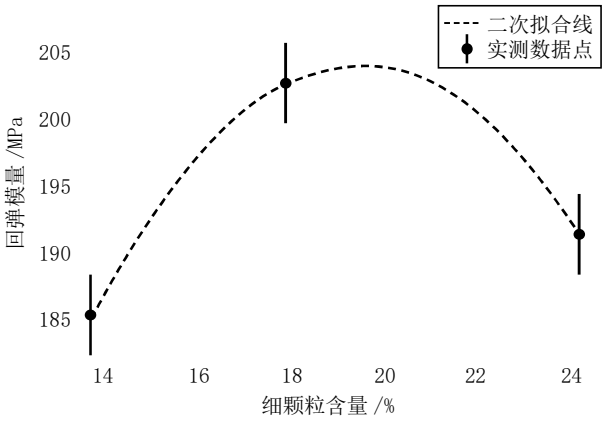


图2 不同级配方案回弹模量对比图

B组在模量与抗剪强度间达到性能均衡，更符合风电场道路在高频重载工况下的服役要求。

4 结论

1. 风电场道路服役环境复杂，碎石基层需具备良好压实性、强度稳定性与弹性恢复性能。通过不同粒径级配碎石组合对比，验证了粒径组成对材料结构性和力学响应的直接控制作用，合理级配可显著提高整体性能。

2. 试验结果显示，B组在最大干密度、CBR强度与回弹模量指标上均表现优越，最大干密度达2.223 g/cm^3，浸水CBR值提升至78.4%，回弹模量保持在163.2 MPa，表现出良好的抗剪能力与变形恢复能力，适应重载与周期冻融工况。

3. 从力学行为与现场适应性角度综合分析，B组级配在密实度与承载力之间实现均衡优化，建议在丘陵—沙质过渡地貌风电场道路中推广应用，为无结合料基层材料设计提供技术支撑与数据依据。

参考文献：

[1] 李拥军.基于水泥混凝土路面改造工程的共振碎石化技术应用设计要点及验收指标研究[J].科技创新与应用,2025,15(26):119-122.

[2] 姚云龙,刘鑫,邵志伟,等.桩土复合路基浅层垫层内摩擦角测试研究[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(04):108-115.

[3] 宋晓雷.粒径及摩擦系数影响下级配碎石休止角特征及仿真研究[J].山西交通科技,2025(03):44-49.

[4] 董红阳.浅析煤矸石在道路路基工程中替代碎石的技术应用[J].煤矿现代化,2025,34(03):161-164.

[5] 李梦威,卢正,唐楚轩,等.基于冲击荷载法的碎石土路基力学特性及压实质量评价研究[J].岩石力学与工程学报,2025,44(06):1649-1657.