

沙漠公路风积沙路基填筑材料选择与施工技术探究

李 睿

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】：针对沙漠地区风积沙路基填筑过程中存在压实稳定性差、含水控制困难及表层易风蚀等问题，文章围绕风积沙材料性能、改性配合比设计及施工质量控制展开研究。通过分析风积沙颗粒组成与工程特性，提出复合稳定剂与细料补偿相结合的改性方案，并构建分层填筑、动态含水调控及表层防护协同施工工艺。研究表明，改性风积沙能够有效提高路基压实稳定性与整体承载能力，减少表层起砂及边坡松散问题，对沙漠地区公路路基施工具有一定参考价值。

【关键词】：风积沙；公路路基；填筑材料；配合比设计；施工质量控制

DOI:10.12417/3083-5526.25.11.004

引言

随着沙漠地区交通基础设施建设规模不断扩大，风积沙因储量丰富、运输距离短等特点逐渐被应用于公路路基填筑工程^[1]。但风积沙普遍存在颗粒级配单一、天然含水率低、压实敏感性高及抗风蚀能力不足等问题，在高温、大风及快速蒸发环境下容易出现压实不均、表层松散及边坡失稳等现象^[2]。为提高风积沙路基施工质量与长期稳定性，文章结合某沙漠地区公路工程，对风积沙材料性能、改性配合比设计及施工质量控制措施进行研究，以提升风积沙路基施工适应性及工程应用效果。

1 工程概况

1.1 工程背景与地理环境

本研究针对西北某沙漠地区北缘公路路基工程展开，路线全长 50 km，按二级公路标准进行设计，服务对象为区域油气与农牧物资运输，建设需在极端干旱风沙环境下维持路基稳定与通行安全。从区域大气与下垫面条件看，年均降水量不足 50 mm，蒸发远高于降水，年均风速约 3.5 m/s 且春季大风日频发，叠加开阔沙源带，形成高强度输沙与吹蚀背景。地表地质以风积沙为主，现场调查与取样表明，取土范围内风积沙占比超过 90%，以细砂为主，颗粒级配集中、黏聚力低、天然含水率极低，具高渗透与易流动特性。鉴于物源丰富与运输半径可控，把就地风积沙当作主要填筑材料来使用，可在工程期内显著降低借土开采与远距运输强度；需重点关注的是，其压实敏感性与抗风蚀能力偏弱，必须配套含水率调控、级配优化和表层防护等措施。由此推导，风积沙填筑在资源可得与施工组织层面具备可行性，但需构建契合细砂工艺窗口的质量控制体系。

1.2 风积沙路基填筑的技术难点

鉴于北缘沙漠段路基以细粒风积沙为主，级配集中与黏聚力低把压实过程置于狭窄工艺窗口，所谓压实敏感性即在极小含水率区间内才能达到干密度目标值，含水偏离会导致结构松散与强度折减^[3]。这种材料在强干旱与高风速背景下水分补给受限，施工湿润后又快速蒸发，易出现层间干湿不均与早期干

缩裂缝。进一步观察发现，表层抗风蚀能力薄弱，风蚀指风剪切与吹蚀联合作用剥离粒子并迁移，坡面与路肩最易发生失稳与覆砂。需重点关注的是，罕见暴雨形成短时径流会把孔隙中的细粒搬运出体，诱发渗蚀与淘空，叠加交通荷载的循环剪切，产生累积沉陷与车辙。由此推导，施工组织需同时去处理含水率调控、能量匹配与表层防护的耦合难题，并把材料改性及排风排沙设施的协同配置当作质量控制前提。

2 风积沙路基填筑材料选择与性能优化

2.1 风积沙物理力学性能测试与分析

结合某沙漠公路路基工程就地取样以及室内标准化流程，本研究把风积沙作为测试对象，开展颗粒级配、天然含水率、比重、渗透、直剪、击实以及承载比等项目的测试工作，想要明确材料粒径结构以及骨架强度参数之间的关联，为后续配合比设计以及施工工艺优化提供参考依据^[4]。测试结果显示，风积沙以细砂颗粒为主，颗粒级配较为集中，细颗粒含量较低，天然含水率偏小，具备高渗透、低黏聚的典型特性；内摩擦角相对较高，并且整体抗剪稳定性受含水状态影响十分明显。

围绕不同含水条件下的击实行为，把风积沙放在 5%~15% 含水率区间内开展标准击实试验工作。结果显示，材料压实度随含水率变化呈现先增后减的趋势，最优含水状态附近可以获得较高的干密度，而含水率偏离合理区间之后，结构很容易出现松散以及能量损失的问题。承载能力检测结果显示，随着压实度的提升，材料承载性能同步增强，但是风积沙整体仍旧存在压实敏感性较强的问题，需要借助含水率调控以及级配优化来改善其稳定性。

综合分析可以知道，风积沙具备就地取材以及施工组织便利等优势，但是其低黏聚、高流动以及抗风蚀能力偏弱等特性，对施工阶段的含水控制、压实工艺以及表层防护提出了较高的要求。所以后续需要结合材料改性以及施工参数优化工作，进一步提升路基整体稳定性以及长期服役性能。

2.2 填筑材料配合比设计与优化

鉴于风积沙存在级配集中、细颗粒含量低以及压实窗口狭

窄等特性,本次研究选用水泥、石灰以及水泥—石灰复合稳定剂开展配合比优化工作,同时引入石粉细料补偿措施来改善颗粒级配情况。配合比设计工作把现场可施工性、早期强度、干湿循环稳定性以及抗风蚀能力当作控制目标,重点比较稳定剂类型、掺量、施工含水率以及细料补偿比例对改性风积沙性能产生的影响。

开展稳定剂选择的相关工作时,水泥主要用来提高早期胶结强度,石灰主要用来改善体积稳定性以及抗干湿循环能力,复合稳定剂还能同时兼顾早期强度与后期稳定性。进行试验的过程中,把稳定剂总掺量控制在3%~7%的范围内,其中3%的掺量主要用来判断低剂量改性的效果,5%的掺量用来评价常规施工条件下的强度与经济性平衡情况,7%的掺量用来检验较高剂量下的强度提升与收缩风险。细料补偿比例要控制在0%~6%的范围内,重点考察3%以及6%石粉掺入后,对风积沙颗粒嵌挤、保水能力以及压实均匀性的改善作用。

开展含水率控制的相关工作时,配合比设计不会单纯选用天然含水状态,而是把最优含水率附近的区间当作施工控制区间,同时结合沙漠地区蒸发快、失水快的特性,把施工含水率适当控制在最优含水率附近或者略高的水平^[5]。含水率偏低的情况下,颗粒间的润滑不足,压实之后很容易形成松散结构;含水率过高的情况下,碾压过程中很容易出现局部翻浆、弹软或者强度增长滞后的问题。所以,进行配合比筛选的工作时,会同步比较不同含水状态下的压实效果、试件成型质量以及强度发展情况。

综合试验的结果能够得知,单掺水泥可以较快提升早期强度,但在干湿循环以及表层抗裂方面存在一定的不足;单掺石灰对体积稳定性有一定的改善作用,但早期强度的提升效果相对有限。把水泥—石灰复合稳定剂配合3%~6%的石粉细料补偿之后,能够改善风积沙级配单一的问题,让颗粒间形成更稳定的嵌挤结构,同时还能提高材料的保水性以及压实均匀性。推荐选用5%~7%的复合稳定剂、3%~6%的石粉细料补偿,并且把施工含水率控制在最优含水率附近的略高区间,来兼顾强度、耐久性以及现场施工的适应性。

2.3 改性风积沙材料的性能验证

围绕前期形成的稳定剂掺量、含水控制以及细料补偿等候选区间,本研究没有单纯把强度指标当作评价依据,而是把施工适应性、承载能力以及体积稳定性共同纳入室内验证范围。为保证室内结果与现场施工状态保持一致,试件拌合阶段把最优含水率附近区间当作控制范围来使用,同时把压实度标准与现场施工目标进行统一。成型试件选用直径50 mm、高度100 mm的圆柱结构,随后开展无侧限抗压强度验证工作,并把7 d强度不低于1.5 MPa作为判定条件。除此之外,还选用直剪以及等效固结排水三轴方案,对内摩擦角以及黏聚力变化情况开展同步分析,把强度参数、含水状态以及能量输入之间的关系

进行关联,以便对路基承载以及边坡稳定计算开展一致性校核工作。

考虑风积沙路基后期长期服役过程中容易受到风蚀、盐析以及循环环境影响,所以耐久验证部分没有局限于单一工况,而是把多种环境作用联合纳入评价程序。干湿循环主要被用来开展水化可逆性以及盐析出影响的分析工作,盐溶胀崩解试验则借助硫酸盐溶液浸渍以及自然干燥交替方式,对孔隙结构扰动情况进行表征。鉴于北缘沙漠区域同时存在强风以及短历时径流影响,还设置风洞磨蚀以及人工降雨坡面渗蚀试验。前者把剪切起动阈值以及单位面积失土速率当作评价依据来使用,后者则围绕细颗粒迁移以及入渗稳定性,对排水以及加筋措施开展约束分析工作。

为了减小早期开裂对抗蚀能力产生的不利影响,试验过程中还加入自由收缩以及约束收缩观测内容,连续记录裂缝起裂龄期、数量以及最大宽度等变化情况。同时,把回弹模量这一重复荷载条件下的等效弹性参数并入评价体系,对其在交通循环作用下的变形适应能力开展分析。若验证过程中任一指标接近临界状态,则需要把稳定剂比例、细料补偿范围以及含水窗口重新开展联合调整工作,并形成二次优化路径。借助室内验证以及施工需求之间的对应关系,能够把改性风积沙材料性能评价与现场实施条件保持协调。

3 风积沙路基填筑施工技术 with 效果评估

3.1 填筑施工工艺优化与流程设计

鉴于某沙漠地区公路工程长期处在高温、干旱以及强风环境下,风积沙路基施工过程中容易出现失水过快、压实不均以及表层吹蚀等情况,因此施工组织把基底整治、含水调节、分层填筑以及表层保护进行联动控制,并形成连续施工流程。施工开始前,先把地表浮沙以及软弱土层开展清理工作,清理深度控制在15~20 cm之间,同时对下承层进行整平以及压实处理,使其承载状态保持均匀。考虑风积沙后期易产生局部变形的问题,在基底位置铺设双向土工格栅来进行隔离以及加筋处理,格栅搭接长度不小于0.3 m,边缘位置还需设置锚固沟来开展固定,以减小填筑后边部沉陷以及侧向位移。

沙漠区域蒸发速度较快,施工阶段水分损失较明显,所以在填筑前需把风积沙开展预湿处理工作。现场多选用分段供水以及机械拌合方式,使填料内部含水状态保持均匀,同时借助动态检测去检查其含水变化情况。施工含水率一般控制在最优含水率附近偏高区间,当检测结果出现偏差后,再根据现场状态去开展补水、翻拌或者短时晾晒处理,避免后续压实过程中产生松散以及局部失稳问题。

填筑阶段把分层摊铺方式当作主要施工方法来使用,单层松铺厚度保持在0.30 m左右。平地机完成整平后,还需形成2%~3%的横坡,以便施工期间临时排水。压实过程选用12~

18 t 振动压路机进行作业,并按照“静压—强振—弱振—终压”的顺序开展碾压工作,总碾压遍数控制在6~8遍之间,运行速度保持在1.5~1.8 km/h 范围内。路肩、边坡以及结构物邻近区域不适宜大型设备连续作业,因此还需选用小型夯实设备去开展补压处理。

风沙天气下,已完成压实的表层很容易出现颗粒流失以及失水开裂,所以每层施工结束后,需要马上开展临时防护工作。现场可选用喷洒抑尘材料或者覆盖薄膜等方式,减少表层颗粒被风带走的问题。依靠含水调节、基底处理以及分层压实等多环节协同控制后,风积沙路基整体施工稳定性能够得到提高,施工期间表层松散以及局部变形问题也可得到一定程度控制。

3.2 施工质量控制与实施效果分析

风积沙路基施工过程中,含水率稳定性、压实均匀性及表层抗风蚀能力会直接影响路基成型质量。因此,现场施工将含水调控、分层压实与动态检测作为质量控制重点,并结合高温、大风及快速蒸发等环境特点,对施工参数进行动态调整。施工阶段采用分段供水与机械翻拌相结合的方式控制填料含水状

态,使其保持在适宜压实区间内;对于局部失水区域,通过雾化补水减少颗粒离析与表层松散问题。现场检测采用环刀法与灌砂法联合控制,对压实状态及含水率进行动态检查,并及时对异常区域进行补水、翻拌或补压处理。同时,对已完成压实的作业面采取覆盖或抑尘措施,减少风蚀及失水开裂。施工结果表明,改性风积沙路基整体压实稳定性明显提高,表层起砂、局部弹软及边坡松散等问题得到有效控制,可较好适应沙漠地区公路路基施工需求。

4 结语

文章围绕沙漠地区风积沙路基填筑需求,对风积沙材料性能、改性配合比及施工质量控制进行了系统研究。研究结果表明,采用复合稳定剂与细料补偿措施后,风积沙颗粒嵌挤能力与整体稳定性得到改善;结合动态含水调控、分层压实及表层防护措施,可有效提高路基压实均匀性,减少风蚀、起砂及局部松散等问题。相关施工工艺能够较好适应沙漠地区高温干旱与强风环境,对类似地区风积沙路基工程施工具有一定参考意义。

参考文献:

- [1] 王承志.风积沙在路基填筑中的应用[J].交通世界,2025,(21):22-24.
- [2] 赵金宝,赵纯锋,张疆飞,等.干旱荒漠区填筑风积沙路基稳定性研究[J].北方交通,2024,(07):42-45.
- [3] 刘海军,陈国,朱孟艳,等.风积沙路基填筑施工技术[J].建筑技术开发,2023,50(11):58-60.
- [4] 杨廷港.风积沙路基填筑施工关键技术探讨[J].江西建材,2022,(11):308-310.
- [5] 张新.风积沙路基填筑施工在乌玛高速公路中卫段的应用分析[J].运输经理世界,2022,(23):150-152.