DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250823

北横通道沥青混合料短驳运输质量控制技术研究

左峰委
[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

摘　要: 针对上海北横通道隧道工程受 3 m限高制约导致大型沥青运输车无法直达摊铺现场的难题,创新采用“场外长距离运输+隧道口短驳转运”模式。通过构建“短驳专班”垂直管理体系,明确各岗位职责并配置 15 辆专用短驳车(净高＜2.8 m)及 6 名专职人员,实现拌合站调度、隧道转运与摊铺接收的全流程闭环管控。聚焦温度损失、离析风险及安全效率平衡 3 大难点,实施综合技术措施:优化拌合站出料温度 SMA-13 提升至 180~190 ℃、AC-20C 提至 170~180 ℃;严格限定单次短驳时间≤30 min,且全程车速≤20 km/h;采用保温篷布覆盖料斗、隔离低温地面作业及构建分段定点测温+数据台账联动方案强化料温动态监控,并在摊铺前进行级配快速抽检完善离析控制。实施效果表明,短驳环节温控显著,SMA-13 和 AC-20C 混合料短驳环节温降仅 8 ℃和 7 ℃,摊铺温度达 168 ℃和 160 ℃;SMA-13 路面压实度平均为 97.5%、AC-20C 平均为 97.2%、平整度 σ 值为 1.2 mm、渗水系数为 65 mL/min。各指标均优于规范,施工全程零安全事故。为城市受限空间沥青混合料高效短驳运输提供了可复用的实践范式。

关键词: 北横通道;沥青混合料;短驳运输;温度控制;受限空间施工
中图分类号: U416.217;U415.2;TU997　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0159-06

Research on Quality Control Technology of Asphalt Mixture Short-haul Transportation in Beiheng Passage

ZUO Fengwei
[Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: In response to the problem of large asphalt transport vehicles being unable to reach the paving site directly due to the 3-meter height limit in the Shanghai Beiheng Passage Tunnel Project, the “long-distance transportation outside the site + short-haul transfer at the tunnel entrance” mode is innovatively adopted. By establishing a vertical management system of “short-haul special teams”, the responsibilities of each position are clarified, and 15 dedicated short-haul trucks (with a net height of less than 2.8 m) and 6 full-time staff members are allocated to achieve the full process closed-loop control of mixing station scheduling, tunnel transfer and paving reception. Focusing on the three major difficulties of temperature loss, segregation risk and safety efficiency balance, the comprehensive technical measures are implemented, such as optimizing the discharge temperature of the mixing station SMA-13 up to 180~190 ℃, AC-20C up to 170~180 ℃, strictly limiting the single short haul time to ≤ 30 min and the full vehicle speed to ≤ 20 km/h, adopting the insulation tarpaulin to cover the hopper, isolating the low-temperature ground operations, and constructing a segmented fixed-point temperature measurement + data ledger linkage scheme to strengthen the dynamic monitoring of material temperature, and conducting the rapid grading sampling before paving to improve segregation control. The implementation effect shows that the temperature control in the short haul section is significant. The temperature drop in the short haul section of SMA-13 and AC-20C mixtures is only 8 ℃ and 7 ℃ respectively, while the paving temperature reaches 168 ℃ and 160 ℃. The average compaction degree of the pavement is 97.5% for SMA-13, 97.2% for AC-20C, 1.2 mm for smoothness σ value, and 65 mL/min for permeability coefficient. All indicators are better than the standards, and there are no safety accidents throughout the entire construction process, which provides a reusable practical paradigm for efficient short-haul transportation of asphalt mixtures in urban confined spaces.

Keywords: Beiheng Passage; asphalt mixture; short haul transportation; temperature control; construction in confined spaces

收稿日期:2025-08-20
作者简介:左峰委(1986—),男,学士,工程师,从事道路工程施工技术与管理工作。

0　引　言

随着城市地下交通工程的快速发展,隧道作为

缓解地面交通压力的关键设施，其建设质量直接关系到行车安全与使用寿命。沥青混凝土路面作为隧道工程的核心结构层，其施工质量依赖于混合料从生产、运输到摊铺的全流程管控，其中运输环节的稳定性尤为重要。热拌沥青混合料的温度敏感性强，运输过程中的温度损失、离析等问题会直接导致摊铺难度增加、压实度不足，进而影响路面强度、平整度及耐久性[1-3]。在城市隧道工程中，受结构限高、空间狭窄等客观条件限制，大型运输设备往往难以直接进入施工区域，二次短驳运输成为解决这一矛盾的常用方案。然而，短驳过程中的多次装卸、转运不仅延长了混合料暴露时间，增加了温度损失风险，还可能因操作不当引发离析、污染等质量问题，同时面临隧道内交通安全、环境管控等多重挑战[4-6]。如何在受限空间内构建科学高效的短驳运输体系，平衡质量、安全与效率的关系，成为隧道沥青施工领域待解决的技术难题。

北横通道新建一期（东段）工程作为上海中心城区重要的交通枢纽工程[7]，其隧道段采用单管双层盾构结构，限高3 m的设计要求使传统大型沥青运输车无法直接进入。为保障工程顺利推进，项目创新采用“场外长距离运输+隧道口短驳转运”模式。本文以此工程为背景，系统梳理短驳运输的关键技术要点，结合实测数据验证技术体系的有效性，为类似受限空间沥青混合料运输工程提供可借鉴的实践经验与技术参考。

1　工程背景与技术难点

1.1　工程概况

北横通道新建一期（东段）工程西起梧州路工作井，东至黄兴路工作井，地下道路全长约6.7 km，采用单管双层盾构法隧道形式，设计时速60 km/h，限高3 m[8-10]。隧道段沥青路面工程主要包括155 193 m^2的4 cm SMA-13（SBS）阻燃净味改性沥青面层和147 721 m^2的5 cm AC-20C（SBS）阻燃净味改性沥青中层，计划施工工期为2024年2月20日—2025年12月30日，其中隧道段需在2024年4月30日前完成。因隧道限高3 m的硬性限制，传统大型沥青运输车辆（净高普遍超过3.5 m）无法直接进入施工区域。经现场勘查，确定在隧道进出匝道敞开段设置短驳点，采用净高2.8 m以下的短驳车辆进行二次转运，短驳运输距离约1~2 km/段。隧道横断面图如图1所示。

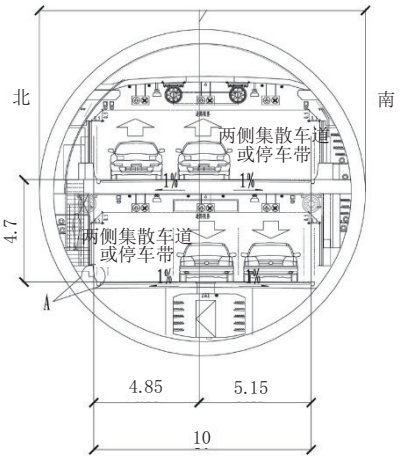

图1　隧道横断面图（单位：m）

1.2　核心技术难点

短驳运输作为北横通道沥青施工的关键环节，受限于隧道空间条件、材料特性及施工环境，面临三大核心技术难点，直接影响工程质量、安全与效率目标的实现。具体如下。

（1）温度损失风险：沥青混合料经二次转运后易产生温度降低，可能导致摊铺、压实质量下降。SMA-13最佳摊铺温度需保持在160~180 ℃[11-12]，AC-20C需保持在150~170 ℃[13-14]，温度每降低5 ℃将显著增加压实难度。因此，如何将短驳环节的温度损失控制在合理范围内，是保障沥青混合料施工性能的首要难点。

（2）质量均匀性控制：沥青混合料的均匀性直接决定路面的承载能力和耐久性，而二次转运过程易加剧离析风险。隧道内施工空间狭窄，短驳点与摊铺现场的调度节奏紧凑，难以对每车混合料进行全面的均匀性检测，增加了离析问题的隐蔽性。因此，如何通过规范操作流程、优化设备参数来减少转运过程中的离析，是保障路面质量均匀性的核心挑战。

（3）效率与安全平衡：北横通道为单管双层结构，内部通道宽度仅10 m，且需兼顾上下层施工材料运输与作业人员通行，安全与效率的矛盾尤为突出。因此，如何在“限速行驶、人车分离、环境达标”的安全约束下，优化运输路线与调度节奏，实现效率最大化，是短驳运输组织的关键难点。

2　短驳运输组织架构设计

2.1　管理体系构建

针对隧道短驳运输涉及环节多、空间受限、质量安全要求高的特点，项目部创新建立了“短驳专班”垂直管理机制。该机制以“责任闭环、流程可控、风

险前置”为核心,通过明确从决策层到执行层的全链条岗位职责,实现短驳运输从拌合站调度、现场卸料、隧道转运到摊铺接收的一体化管控。具体各岗位职责见表1。

表1　各岗位职责表

岗位	主要职责	协作部门/岗位
专班负责人	统筹短驳全流程管理,制定工作方案,协调解决重大问题,监督任务落实	各业务部门、运输团队
调度协调岗	负责短驳车辆调度、路线规划,对接供需两端需求,实时跟踪运输进度	拌合站、运输执行岗
材料运输现场	协调拌合站与短驳点衔接,确保材料数量、状态与单据一致	调度协调岗、拌合站
运输执行岗	按调度指令完成材料短驳运输,确保运输安全、准时,反馈途中异常情况	调度协调岗、摊铺现场接收人员
摊铺现场对接岗	负责摊铺现场材料接收与核验,反馈物料供应及时性,协调运输车辆与摊铺设备作业衔接	运输执行岗、摊铺操作班组、调度协调岗
信息统计岗	记录短驳任务数据,整理运输台账,生成日报/周报,分析流程优化点	各岗位、数据管理部门
应急处理岗	响应运输或摊铺衔接突发情况(如车辆故障、材料供应中断),协调备用车辆或补充材料,保障摊铺连续作业	调度协调岗、后勤保障部门、摊铺班组

2.2　资源配置方案

本次工程投入的设备包括15辆核定载重15 t的专业短驳车辆,可满足批量货物短途转运需求,符合道路运输和现场安全规范。同时配套投入1台挖掘机和1台铲车,用于货物装卸、场地整理等辅助作业,两类设备也已完成前期登记、性能检测及报审流程,确保作业合规与安全。短驳车辆示意图如图2所示。

图2　短驳车辆示意图

作业现场共部署6名专职管控人员,负责现场作业的统筹协调、安全监管及流程把控,确保各项工作有序推进。具体人员分工及职责见表2。

表2　人员配置表

岗位职责	单位	数量	备注
短驳点装卸负责	人	2	材料+项目部各一人
短驳引领	人	1	项目部
摊铺现场	人	2	摊铺队+项目部各一人
现场安全巡视	人	1	项目部

3　温度损失控制技术

3.1　拌合站出料温度优化

考虑到短驳转运环节的热量损耗,在保障沥青材料不发生老化的前提下,对拌合站出料温度进行针对性提升。具体优化数据见表3。

表3　拌合站出料温度优化表　　单位:℃

沥青类型	标准出料温度	短驳专用出料温度	提升幅度
SMA-13	170~180	180~190	10
AC-20C	160~170	170~180	10

3.2　转运时间管控

为最大限度缩短沥青混合料运输过程中的暴露时间,减少温度损失,项目从路线规划、速度控制及时间限值3方面实施精细化管理。结合施工摊铺组织示意图专项规划短驳点至摊铺现场的路径,优先选择距离最短、路况最稳定的路线,通过固定位置与最优路线匹配避免绕路或停滞,从空间维度减少无效运输时间。针对隧道空间狭窄、环境复杂的特点,限定短驳车辆正常行驶路段车速≤20 km/h,转弯、会车及回转区域车速≤ 5 km/h,并通过GPS定位系统实时监控确保合规,既规避安全风险,又减少急加速减速对混合料稳定性的影响,同时以匀速行驶控制运输时间波动。时间限值方面,明确全流程时间红线,从拌合站出料至摊铺现场接收总时长≤2 h,其中短驳车辆从短驳点装载至送达摊铺现场的单次转运时间≤30 min,通过刚性时间标准倒逼各环节高效衔接,确保混合料在最佳温度区间内完成转运,为后续摊铺质量奠定基础。本次工程短驳点共设置4处,分别位于新建路附近、安国路井旁、黄兴路匝道区域、嫩兴路井周边。

3.3　保温措施强化实施

所有短驳车辆料斗顶部覆盖阻燃保温篷布,形成密闭保温空间,降低与外界环境的热交换。短驳卸料点采用加厚彩条布铺筑隔离地面低温,同时要求挖掘机与铲车作业时抬高5 cm操作,减少混合料与地面直接接触面积,降低传导散热风险。

3.4　料温动态监控优化

为提升沥青混合料短驳运输过程中料温动态追

踪的精准度，构建分段定点测温+数据台账联动简化方案。该方案在短驳运输全流程设置三个关键测温节点，一是短驳点装载后，车辆完成装载即刻，用插入式测温仪插入料斗中心区域检测温度，深度不低于30 cm，记录为“装载后初始温”；二是隧道内中途停靠点，沿短驳路线每300 m设置临时观测点，车辆到达后停靠1 min内完成中心温度检测，记录为“中途节点温”；三是摊铺现场卸料前，车辆停靠摊铺机旁，在卸料前10 min内检测料斗中心温度，记录为“卸料前终温”。同时建立“温度-时间-车辆”联动台账，每辆车每次运输都要记录车辆编号、三个节点的温度值及对应检测时间、运输总时长，若有中途停留情况也要注明原因。借助多节点数据能够直观还原混合料温降过程，当某一节点间的温降幅度超过3 ℃时，可快速定位异常环节，比如保温篷布破损造成中途温降过快、停靠时间过长导致卸料前温降超标等，进而及时采取补正措施，像更换篷布、优化调度减少停靠等。

4　质量保障体系建设

为全面保障沥青混合料短驳运输的质量与安全，项目部从材料进场、现场作业及质量监控3个方面建立一个闭环管理方式。具体如下。

4.1　材料进场控制

为确保沥青混合料质量，在所有短驳车辆侧面预设距车厢底部30 cm的专用温度检测孔，便于精准测量混合料核心区域温度，每车进场前均需检测，确保SMA-13混合料温度不低于160 ℃、AC-20C混合料温度不低于150 ℃，温度不合格的混合料直接退回拌合站，从源头避免温度不足影响摊铺与压实质量。

4.2　现场作业规范

短驳车辆在隧道口指定区域纵向排列有序等候，每车间距严格保持15 m，卸料环节由专人全程指挥调度，按摊铺进度依次引导车辆进入卸料区域，确保大型沥青运输车与短驳车辆在狭窄通道内无交叉作业，彻底规避交汇冲突，保障运输流线高效顺畅。卸料操作中，短驳车辆到达摊铺现场后需精准停靠在距摊铺机10~30 cm处，熄火后平稳开启卸料装置缓慢卸料，严禁撞击摊铺机以防混合料离析，同时控制卸料速度均匀可控，避免溢出或堆积不均，确保摊铺原料级配稳定。在隧道内施工区域，项目部配置专业气体检测设备，每日对作业区域进行常态化监测，重点监控氧浓度，维持在19.5%~23.5%安全区间。一旦有指标超标，立即停止作业并启动强制通风，待环境恢复安全标准后再施工，全面保障现场人员健康与作业安全。

4.3　过程质量监控

对每车混合料的出料时间、运输过程温度、现场卸料时间等关键数据进行详细记录，建立完善的短驳车辆进出台账。施工设备全部采用清洁能源，定期对喷油嘴进行净化处理以确保燃烧充分，从源头减少有害气体排放，优化作业环境。

4.4　离析控制量化检测

为精准把控沥青混合料短驳运输过程中的级配均匀性，避免离析问题影响路面质量，现推行混合料级配均匀性双重检测措施。一方面开展摊铺前快速抽检，每5车混合料随机抽取1车，采用便携式级配分析仪，在卸料前从料斗前、中、后不同位置分别取样，检测0.075、2.36、4.75 mm等关键筛孔的通过率，与拌合站出厂级配进行偏差对比，若偏差超过3%，立即暂停该车辆卸料，排查装卸过程骨料堆积、运输颠簸导致分层等离析原因；另一方面实施路面成型后芯样分析，按每20车次为一个短驳批次，在对应摊铺路段随机钻取3个芯样开展室内级配试验，分析同一批次内芯样级配的变异系数，当变异系数≤5%时判定级配均匀性达标，若不达标则追溯该批次短驳运输中的车辆选型、卸料速度等环节并进行优化。

5　实施效果验证

通过对短驳运输全流程技术措施的落地执行，项目从温度控制、路面质量、安全与效率3个方面开展效果验证。

5.1　温度损失控制效果

为精准评估短驳环节的温度保障能力，项目对不同类型沥青混合料的全流程温度变化进行跟踪监测，监测结果见表4。

表4　短驳运输温度损失实测表

监测项目	SMA-13	AC-20C
拌合站出料温度/℃	185	175
长距离运输后温度/℃	176	167
短驳前温度/℃	176	167
摊铺现场温度/℃	168	160
总损失/℃	17	15
短驳环节损失/℃	8	7
短驳损失占比/%	47.1	46.7

从表4可以知，SMA-13混合料经拌合站出料、长距离运输、短驳转运至摊铺现场的全流程温度损失为17 ℃，其中短驳环节损失仅8 ℃。AC-20C混合料总损失15 ℃，短驳环节损失7 ℃。两类混合料短驳环节温度损失都均控制在8 ℃以内，且摊铺现场温度分别达到168 ℃和160 ℃，均高于规范要求的最低摊铺温度SMA-13 ≥160 ℃和AC-20C ≥150 ℃。

5.2　路面质量检测结果

施工完成后对已施工的隧道沥青路面进行抽样，分别对压实度、平整度、渗水系数等关键数据进行检测。检测结果见表5。

从表5中可知，SMA-13面层和AC-20C中层的检测结果均远超规范最低要求，其中AC-20C中层标准差≤0.8%，体现出路面压实均匀性高，无局部压实不足问题，为路面强度和耐久性提供核心保障。平整度上，采用连续式平整度仪检测的路面σ值平均仅1.2 mm，最大检测值1.4 mm，均低于规范≤1.5 mm的标准，表明路面表面平整顺滑，无明显起伏或波浪，有效提升了行车舒适性和安全性。密水性与抗滑性能同样可靠，SMA-13面层渗水系数平均值65 mL/min、最大值80 mL/min，远低于规范≤100 mL/min的限值[15]，说明路面结构致密、防水渗透性能良好，而构造深度平均值0.8 mm处于设计要求的0.7~1.0 mm区间，确保路面具备足够抗滑能力，降低雨天行车打滑风险。同时，混合料级配均匀性表现优异，SMA-13面层15个检测点（5批次）芯样级配变异系数平均值3.2%、最大值4.8%，AC-20C中层12个检测点（4批次）芯样级配变异系数平均值2.8%、最大值4.5%，两类混合料芯样级配变异系数均控制在5%以内，且所有检测批次达标率100%，表明短驳运输过程未对混合料级配均匀性造成显著影响，进一步印证了施工质量管控的全面性与有效性。

5.3　安全与效率指标达成情况

施工期间累计投入1 216车次短驳运输，全程未发生死亡事故、重大设备故障、火灾及有毒气体超标事件，负伤率为0。隧道内环境监测数据稳定，氧浓度日均保持在20.5%~22.0%的安全区间，沥青烟、一氧化碳等有毒气体浓度均低于职业接触限值，未出现人员健康异常报告。施工效率上，短驳运输日均完成混合料转运量约300 t，与摊铺设备产能精准匹配，实现日均沥青摊铺面积2 000 m²。从拌合站出料至摊铺完成的全流程时间平均为1.5 h，短驳环节单次转运时间平均25 min，均严格控制在2 h及30 min的限值内。

6　结　论

本文以北横通道新建一期（东段）工程隧道沥青混合料短驳运输实践为背景，通过构建系统化的组织管理、温度控制及质量保障体系，有效解决了受限空间内沥青混合料二次转运的技术难题，主要结论如下。

（1）创新建立“短驳专班”垂直管理机制，明确各岗位权责并优化资源配置，实现了从拌合站调度、现场卸料到摊铺接收的全流程闭环管控。15辆专用短驳车辆与6名专职管控人员的协同配合，确保了狭窄隧道空间内运输流线顺畅，为质量与安全管控奠定了组织基础。

（2）通过“出料温度优化+转运时间管控+保温措施强化+分段定点测温”的综合技术方案，成功将短驳环节温度损失控制在8 ℃以内，且单节点最大温降≤4 ℃，动态温控精度显著提升。其中，SMA-13混合料短驳损失8 ℃、AC-20C短驳损失7 ℃，摊铺现场温度分别达168 ℃和160 ℃，均满足规范最低摊铺温度要求，有效保障了沥青混合料的施工性能。

（3）通过“摊铺前快速抽检+路面成型后芯样分析”的离析控制量化检测措施，SMA-13和AC-20C芯样级配变异系数均≤4.8%，达标率100%，验证了短驳过程中混合料级配均匀性。路面完工后对路面进行检测，检测结果显示：压实度SMA-13平均值为97.5%、AC-20C平均值为97.2%；平整度σ值平均为

表5　北横通道沥青路面检测结果表

检测项目	沥青类型	检测点位数量/个	检测结果（平均值/最小值/最大值）	规范要求	结果评价
压实度	SMA-13面层	50	平均值97.5%，最小值96.8%	≥96 %	均高于规范要求
	AC-20C中层	45	平均值97.2%，最小值96.1%，标准差≤0.8%	≥95 %	满足规范要求
平整度	—	—	σ值平均1.2 mm，最大检测值1.4 mm	≤1.5 mm	优于规范标准
渗水系数	SMA-13面层	30	平均值65 mL/min，最大值80 mL/min	≤100 mL/min	密水性良好
构造深度	—	20	平均值0.8 mm	0.7~1.0 mm	符合设计要求
级配均匀性	SMA-13面层	15（5批次）	平均值3.2%，最大值4.8%	≤5%	达标率100%
	AC-20C中层	12（4批次）	平均值2.8%，最大值4.5%	≤5%	达标率100%

1.2 mm；渗水系数平均值为65 mL/min；构造深度平均值为0.8 mm，均优于规范要求、验证了管控体系的有效性。同时，施工期间无安全事故发生，隧道内环境指标稳定。

综上所述，本项目形成的受限空间沥青混合料短驳运输技术体系，通过“组织—技术—管理”的协同创新，实现了质量、安全与效率的平衡，可为类似城市隧道、地下工程等受限空间的沥青混合料运输提供可复制的实践经验。

参考文献：

[1] 潘鹏.沥青混合料运输过程温度离析及温度智能监测研究[D].天津：河北工业大学，2023.
[2] 程浩，孙引浩，唐樊龙，等.运输过程中沥青混合料温度的时空演化研究[J].公路，2025(8)：92-100.
[3] 王金阳.沥青混合料离析的成因与防治措施[J].四川水泥，2023(11)：243-245.
[4] 陆云峰.公路沥青路面施工技术和质量控制措施分析[J].工程技术研究，2024，9(1)：128-130.
[5] 江成举.公路沥青路面离析原因及控制措施探讨[J].江西建材，2023(11)：351-352；355.
[6] 王盟.特长公路隧道沥青烟扩散行为与人员健康风险预测研究[D].兰州：兰州理工大学，2022.
[7] 董志国，顾伟健，彭一力.上海城市交通更新中的数智技术的探索与实践[J].中国市政工程，2023(5)：6-10；114.
[8] 陈江.受限空间内大直径盾构整体式过站施工关键技术研究[J].城市道桥与防洪，2024(11)：213-216.
[9] 霍秋颖.北横通道东段隧道建设重难点分析及创新实践[J].工程技术研究，2025，10(12)：9-12.
[10] 朱康，吴佳华，王俊骅.城市快速路交通安全评价要点探析——以上海北横通道为例[J].道路交通管理，2024(3)：32-35.
[11] 张熙.高速公路SMA-13沥青路面施工技术应用分析[J].交通世界，2022(12)：118-119.
[12] 任官伟.SMA-13沥青路面施工工艺与质量控制[J].建筑机械，2023(8)：88-89；95.
[13] 戎鹏.汕湛高速公路清云段AC-20C沥青中面层试验段施工技术分析[J].交通世界，2021(增刊2)：67-68.
[14] 甘华宁.骨架密实型抗车辙AC-20C中面层施工[J].建材与装饰，2015(51)：286-287.
[15] JTG F40—2004，公路沥青路面施工技术规范[S].

（上接第152页）

公路交通科技，2021，38(7)：22-28.
[6] 段文涛，程芬.高填路堤沉降有限元解法[J].路基工程，2009(5)：105-106.
[7] 吴俊，陈开圣，龙万学.高填方路基沉降变形有限元数值模拟[J].公路工程，2009，34(2)：27-29；33.
[8] 谌呈.基于ABAQUS的高速公路路基沉降影响因素分析[J].湖南交通科技，2022，48(2)：12-15；75.
[9] 牛小玲.高填方路基沉降变形影响因素模拟分析[J].北方交通，2023(1)：56-59.
[10] 李宁，张海凤，周川滨.高填路基分层填筑过程非线性有限元分析[J].高速铁路技术，2020，11(5)：42-45；91.
[11] 尹紫红，杨建中，朱波，等.基于ANSYS的软土路基路堤分层填筑的沉降分析[J].路基工程，2017(1)：49-52.
[12] 李占锋.山区高填路堤沉降特征研究[J].公路工程，2019，44(2)：169-172；216.
[13] 仲小玲，潘明江.清伊高速公路路基沉降仿真分析[J].公路交通技术，2018，34(5)：7-11.
[14] 娄燕斌.填方路基处理方法思考与研究[J].城市道桥与防洪，2023(12)：160-163.
[15] 李艳琴.浅谈轻质填料在路基中的应用[J].城市道桥与防洪，2024(2)：33-36.
[16] 凌建明，陈声凯，曹长伟.路基土回弹模量影响因素分析[J].建筑材料学报，2007(4)：446-451.
[17] 刘维正，曾奕珺，姚永胜，等.含水率变化下压实路基土动态回弹模量试验研究与预估模型[J].岩土工程学报，2019，41(1)：175-183.
[18] 王伟伟.高填方路基沉降特性及填土参数影响分析[J].交通世界，2023(11)：38-40.
[19] 董琳琳，崔新壮.压实度对中高路堤沉降影响的数值分析[J].公路，2009(7)：17-20.