

路拌法在农村道路路基施工中的适用性——以果王公路为例

龙咏源¹ 李伶俐² 龙泓锦³

1. 湖南农业大学水利与土木工程学院, 中国·湖南 长沙 410128

2. 湖南省第三工程有限公司, 中国·湖南 湘潭 411100

3. 衡阳市水旱灾害防御事务中心, 中国·湖南 衡阳 421001

摘要: 当前农村道路建设面临资金短缺与质量控制难度大等普遍问题, 本文以河北省石家庄市藁城区果王公路改造工程为依托, 探究路拌法在农村道路路基施工中的适用性与综合效益。通过室内土工试验, 检验施工后路基土体的物理指标、压实度及加州承载比 (CBR)。试验结果表明: 项目沿线土质为低液限粘土, 路基整体压实度达 94%, CBR 值区间为 5.8%~7.9%, 各项指标均符合工程规范要求。研究证实, 路拌法适用于农村道路路基施工, 具有较高的工程推广价值。

关键词: 路拌法; 农村道路; 路基施工; 压实度; CBR

Applicability of road mixing method in rural road subgrade construction – taking Guowang Highway as an example

Long Yongyuan¹, Li Lingli², Long Hongjin³

1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Hunan Agricultural University, China Hunan Changsha 410128

2. Hunan No.3 Engineering Co., Ltd., China Hunan Xiangtan 411100

3. Hengyang Flood and Drought Disaster Prevention Affairs Center, China Hunan Hengyang 421001

Abstract: Currently, rural road construction faces common issues such as funding shortages and difficulties in quality control. This paper, based on the Guowang Highway reconstruction project in Gaocheng District, Shijiazhuang City, Hebei Province, explores the applicability and comprehensive benefits of the road mixing method in rural road subgrade construction. Through indoor geotechnical tests, the physical indicators, compaction degree, and California Bearing Ratio (CBR) of the subgrade soil after construction were examined. The test results show that the soil along the project is low liquid limit clay, the overall compaction degree of the subgrade reaches 94%, and the CBR value ranges from 5.8% to 7.9%. All indicators meet the engineering specification requirements. The study confirms that the road mixing method is suitable for rural road subgrade construction and has high engineering promotion value.

Keywords: Road mixing method; Rural roads; Subgrade construction; Compaction degree; CBR

0 引言

截至 2023 年底, 我国农村公路通车里程达 459.86 万公里, 占全国公路总里程的 84.6%, 是全国公路交通网络的重要组成部分。但农村道路建设长期受多重因素制约: 建设资金主要依赖地方财政与上级补助, 资金缺口较大, 部分工程为压缩成本被迫降低建设标准; 一线施工人员专业能力参差不齐, 先进施工工艺与质量管控手段落实不到位, 逐渐形成“资金不足、工程质量偏低、后期养护频繁”的恶性循环^[1-6]。同时, 农村地区地形复杂^[7], 平原、丘陵山地交错分布, 传统场拌法需要单独修建拌合站, 且物料需要二次转运, 不仅推高工程造价, 还会对沿线生态环境

造成不利影响。

路拌法可实现就地拌合作业, 大幅减少物料转运环节, 目前已在铁路路基、高等级公路工程中得到成熟应用。国内众多学者针对路拌法的施工流程、压实参数、材料配合比及质量管控措施开展了大量研究: 刘路等^[8]结合松原至通榆 (吉蒙界) 段高速公路, 确定了水泥改良土路拌法的最优施工参数; 马月申^[9]以某公路工程石灰土底基层为研究对象, 系统阐述了路拌法施工的完整工艺流程, 并通过压实度检测与滴定试验验证了该工艺的施工质量; 姚孟龙^[10]等人对比分析路拌法与场拌法后提出, 路拌法在提高工作效率、控制工程成本方面优势突出。不过现有研究大

多聚焦于铁路、高速公路等大型重点工程,针对覆盖面广、建设条件差异显著的农村道路路基工程,相关研究仍较为匮乏。

本文以河北省石家庄市藁城区果王公路改建工程为实例,结合现场施工与室内试验,系统梳理路拌法完整施工工艺流程,检验沿线土体性能、路基压实度与 CBR 指标是否满足施工标准,并从社会、环保、经济三个维度综合分析该工艺的应用效益以期为同类农村道路路基工程提供技术参考。

1 路拌法施工工艺

1.1 工程概况

果王公路地处石家庄市藁城区南部,线路起点衔接建设路,终点至梅花镇梅花村北街,路线全长 9.84km (见图 1)。该路段原有双向两车道升级为双向六车道,路基宽度设计为 39.5m。工程选址位于太行山东麓山前倾斜平原,海拔 20~100 m,地势平坦开阔,属于典型平原微丘区农村公路。沿线地层以第四系冲洪积黄土夹砂砾石层为主,土质均匀稳定,砂、砾石、水泥、施工用水供应充足,具备良好的施工条件。



图1 果王公路地理位置

1.2 路拌法施工工艺流程

本次工程中路拌法施工分为七大核心环节,具体施工流程及技术要点如下:

1.2.1 施工准备

(1) 原材料检验与配合比设计: 根据图纸,综合室内击实试验和无侧限抗压强度试验,确定水泥掺量为 5% (按干土质量百分比),素土采用沿线低液限粘土 (塑性指数平均 11.7,最佳含水量约 14.2%);水泥须检测初凝时间 $\geq 3\text{h}$ 、终凝时间 $\geq 6\text{h}$ 、28d 抗压强度 $\geq 32.5\text{MPa}$ 及安定性,素土须检验液限、塑限、塑性指数、天然含水量及有机质含量,确保塑性指数 ≤ 17 、天然含水量在最佳含水量 $\pm 3\%$ 范围内。粉料撒布车按水泥剂量 5%、撒布宽度 2.5m、行进速度 1.5~2.0km/h 计算并设定单位面积撒布量约 $10\sim 12\text{kg}/\text{m}^2$ 。

(2) 原地面处理:

清除地表植被、树根、软表土及腐殖土,对坑穴、沟槽等软弱地基挖除后换填合格填料并分层压实至压实度 $\geq 90\%$,再经冲击碾压或振动碾压平整,用平地机使基面平整度满足 3m 直尺间隙 $\leq 15\text{mm}$ (见图 2)。



图2 路面清表

(3) 施工放样:

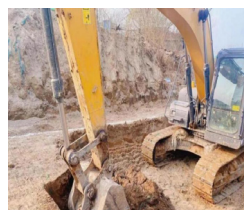
每 10m 设一桩,根据路基中边桩高程及设计坡度放出边桩位置,边桩超宽 30cm,用白灰或水泥撒出施工边线。

(4) 试验段铺设:

正式施工前,应选取具有代表性的路段 (长度 $\geq 100\text{m}$,宽度为全幅路基) 作为试验段,旨在验证混合料配合比及水泥撒布量 (5%),确定粉料撒布车行进速度 (初定 1.8km/h) 及单位面积出灰量、冷再生机拌和深度 (30~35cm) 及行进速度 (6~10m/min)、碾压机械组合与碾压速度,同时检测混合料含水量及松铺系数 (本工程松铺系数取 1.23,松铺厚度约 37cm,压实后厚度 30cm),整理试验数据后形成全线施工工艺参数。

1.2.2 土方摊铺至设计标高

在处理完的路基基面上,布设 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 方格网以管控土方摊铺量,结合施工进度合理规划铺筑范围,需密切关注天气预报,若次日有降雨天气,严禁提前摊铺土方;施工段落内除洒水车外,禁止其他车辆通行。土方摊铺平整后,采用快速含水率测定仪或烘干法检测土体含水量,依据设计要求应控制在最佳含水量 $\pm 2\%$ 范围内。若含水量偏低,应均匀洒水后闷料 4~6h;若含水量偏高,则翻松土体进行晾晒,直至指标达标。洒水车禁止在施工段落内停留、掉头,以免造成局部积水 (见图 3)。



(a)



(b)

图3 开挖至设计标高

1.2.3 夯实找平

先用推土机对摊铺土层进行初步整平,再用平地机精细找平,要求路面平整度误差不大超过 15mm,确保摊铺土层厚度均匀(本工程压实厚度 30cm,对应松铺厚度约 37cm)。结合现场桩位实时监测高程,严格控制摊铺厚度,禁止采用薄层贴补的方式找平。

1.2.4 摊铺粉料

将施工路段划分为若干施工段,单段长度控制在 100~200m。通过击实试验测得土体的平均最大干密度为 1.90 g/cm^3 、最佳含水量 14.2%。结合 5% 的水泥掺量计算得出,0.30m 厚土层每平方米水泥用量为 28.5kg。根据单段施工面积核算水泥总用量,由粉料运输车向撒布车供料,设定设备行进速度 1.8km/h、单位面积撒布量 28.5 kg/m^2 ,匀速完成水泥撒布作业。施工过程中避免设备急转或急刹,撒布完成后目测检查均匀性,局部不均区域人工补撒或清理调整(见图 4)。



图4 粉料撒布效果

1.2.5 冷再生机搅拌

水泥撒布完成后,立即使用冷再生机开展就地拌和作业。安排专人全程监管拌和深度,确保达到 30~35cm 的设计要求,设备行进速度控制在 $6\sim 10 \text{ m/min}$,整体拌和 1~2 遍。第一遍拌和结束后检查混合料状态,若存在水泥土团或素土夹层,需进行第二次复拌。拌和合格标准为混合料色泽均匀,无灰团、土团,含水量分布均匀同时拌和深度需深入下承层 1~2cm,杜绝底部土体拌和不彻底的问题(见图 5)。



图5 冷再生机搅拌土料

1.2.6 碾压夯实

碾压作业遵循“先轻后重、先边后中、先慢后快、先

静压、再弱振、后强振、终压静压”的原则,由路基低处向高处、由两侧边线向中线依次碾压。初压速度区分管控:初压 $1.5\sim 2 \text{ km/h}$,复压 $2\sim 3 \text{ km/h}$,终压 $3\sim 4 \text{ km/h}$,纵向碾压搭接宽度 $\geq 2 \text{ m}$,横向碾压重叠宽度 $\geq 40 \text{ cm}$,确保路基无碾压死角。

结合试验段确定最佳碾压工序:静压 1 遍→弱振碾压 1 遍→强振碾压 3~5 遍(每碾压 1 遍检测压实度,直至压实系数 ≥ 0.93)→静压 1 遍收光,整体碾压速度控制在 2.5 km/h 。碾压完成后,路基表面需平整密实、无轮迹、无起皮、弹簧土等病害。若出现起皮问题,需人工翻松表层 10cm 以上土体,洒水后重新碾压;桥涵台背、挡墙后侧等狭小区域,采用小型夯实机补压至指标合格(见图 6)。



图6 压路机夯实

1.2.7 保湿养生

若相邻两层施工间隔超过 24h,需对水泥稳定土层进行养生作业。在路基表面覆盖土工布或塑料薄膜,每天洒水不少于 3 次,保持表层持续湿润,养生周期不少于 7d,养生期间封闭施工路段交通(除洒水车外)。养生结束后,路基表面应呈均匀灰白色,无明显干缩裂缝、路面平顺。可采用重型动力触探仪或回弹弯沉仪抽检路基强度,各项指标达标后方可进行下一道施工工序(见图 7)。



图7 洒水车养护

2 土体物理性质、压实度与 CBR 检测

2.1 试验方案

为检验路拌法施工后的路基质量,本次检测在果王公路沿线 K0+200~K9+200 区间布设 19 个取样点位,点位间距 500~600m,分布均匀。采用人工探坑方式采集原状土

样，取样深度 0.5~1.5m，单位点取样量 $\geq 5\text{kg}$ 并密封保存。
所有室内试验严格遵照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020) 执行：

- (1) 含水率：采用烘干法，烘干温度 105~110℃，细粒土烘干时长 $\geq 8\text{h}$ ，每组试样平行测定两次，取平均值；
- (2) 密度：采用环刀法，其标准环刀容积为 60cm^3 ，每个土样平行测定两次；平行误差 $\leq 0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，取平均值；
- (3) 液限、塑限：采用液塑限联合测定法，其液塑限联合测定仪圆锥质量为 76g，在双对数坐标系中绘制深度 - 含水率关系曲线，查得下沉深度 17mm 对应的含水率为液限，下沉深度 2mm 对应的含水率为塑限；塑性指标为液限与塑限的差值；
- (4) 最大干密度、最佳含水量：采用轻型击实试验，轻型击实分 3 层，每层土料质量约相等，每层击实 25 次，以此绘制 $\rho_d-\omega$ 曲线确定最大干密度和最佳含水量；
- (5) CBR：采用贯入实验，按 94% 压实度制备试件，在浸水 96h 后以 1.27mm/min 速率将贯入杆压入试件，分别计算 2.5mm 和 5.0mm 贯入量下的 CBR 值，每个土样平行测定不少于三次，取平均值；
- (6) 压实度：土壤为细粒土时采用环刀法，当土壤中含砾石时采用灌砂法。

2.2 试验结果

土体物理指标检测结果显示：沿线原状土天然含水量介于 10.7%~12.4%，平均值 11.5%；最大干密度 1.85~1.94 g/cm^3 ，平均值 1.90 g/cm^3 ；液限 28.7%~31.6%，平均值 30.1%；塑限 16.7%~20.6%，平均值 18.3%；塑性指数 10.7~12.5，平均值 11.7。综合判定该土体为低液限粘土，完全满足路拌法施工的土质要求（见表 1）。

表1 土体物理性质指标

序号	编号	含水量 (%)	最大干密度 (g/m^3)	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数
1	K0+200原状土	11.3	1.94	30.3	19.1	11.2
2	K0+780原状土	10.7	1.85	30.1	19.4	10.7
3	K1+325原状土	12	1.93	29.3	16.8	12.5
4	K1+863原状土	11.8	1.85	31.6	20.6	11
5	K2+360原状土	11.9	1.93	31.2	18.8	12.4
6	K2+690原状土	11.3	1.93	29.6	18.2	11.4
7	K3+370原状土	12.4	1.87	31.2	20.4	10.8
8	K3+640原状土	12.1	1.94	30.2	17.9	12.3
9	K4+300原状土	11.7	1.86	29	16.7	12.3
10	K4+844原状土	10.8	1.88	30.9	19.1	11.8
11	K5+298原状土	12.2	1.85	31.5	19.8	11.7

续表1

序号	编号	含水量 (%)	最大干密度 (g/m^3)	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数
12	K5+785原状土	11.6	1.93	29.7	17.9	11.8
13	K6+330原状土	11.0	1.92	30.4	18.5	11.9
14	K6+770原状土	11.8	1.86	29.7	17.9	11.8
15	K7+295原状土	10.8	1.94	29.5	17.6	11.9
16	K7+900原状土	11.9	1.86	29.9	17.8	12.1
17	K8+300原状土	10.8	1.88	28.7	16.8	11.9
18	K8+810原状土	10.9	1.93	30.1	19.1	11.0
19	K9+200原状土	12.2	1.9	30.5	18.6	11.9

全线路基压实度统一达到 94%，符合《公路路基施工技术规范》相关标准；CBR 检测值区间为 5.8%~7.9%，平均值 7.1%，高于二级及以下公路路基填料 CBR $\geq 5\%$ 的规范要求。其中 K5+298、K8+300 等点位 CBR 值最高，达 7.9%，而 K2+360、K2+690 点位数值偏低，为 5.8%，分析原因主要与局部含水量、碾压施工差异相关（见表 2）。整体检测结果证明，采用路拌法施工的路基质量稳定，各项指标均满足设计与规范要求，可为同类农村道路工程提供实践参考。

表2 路基压实度与CBR检测结果

序号	编号	压实度 (%)	CBR (%)
1	K0+200原状土	94	7.1
2	K0+780原状土	94	7.1
3	K1+325原状土	94	7.5
4	K1+863原状土	94	7.5
5	K2+360原状土	94	5.8
6	K2+690原状土	94	5.8
7	K3+370原状土	94	6.3
8	K3+640原状土	94	6.3
9	K4+300原状土	94	7.3
10	K4+844原状土	94	7.3
11	K5+298原状土	94	7.9
12	K5+785原状土	94	7.9
13	K6+330原状土	94	6.9
14	K6+770原状土	94	6.9
15	K7+295原状土	94	7.2
16	K7+900原状土	94	7.2
17	K8+300原状土	94	7.9
18	K8+810原状土	94	7.9
19	K9+200原状土	94	7.1

3 综合效益分析

3.1 社会效益

相较于传统场拌法，路拌法大幅缩减土料的二次转运、重复摊铺等工序，减少施工机械投入及人机交叉作业频次，有效降低施工现场安全风险。该工艺机械化、自动

化程度高，能够精确控制水泥撒布用量与均匀度，保障粉料与土体的拌和质量，从源头提升路基工程整体质量。项目建成后，果王公路获评石家庄市“十大最美农村公路”，充分印证了路拌法在施工安全、工程质量及民生口碑方面的突出社会效益。

3.2 环保效益

路拌法采用的粉料撒布车、冷再生机均采用封闭式作业结构，水泥撒布、土体拌和全程在密闭空间内完成。一方面减少物料转运、与摊铺过程中的材料损耗，提升建材利用率；另一方面从源头抑制扬尘扩散，降低扬尘污染。对比传统场拌法，该施工工艺减少了物料长途转运带来的能耗消耗与碳排放，降低现场文明施工治理成本，契合绿色施工、节能减排的行业发展理念，环保优势显著。

3.3 经济效益

本文仅测算两种施工工艺的直接工程费用（不含管理费、规费等间接成本）。传统场拌法需配备 6 名施工人员、2 台挖掘机、4 台自卸车，单日施工面积约 1800m²，单日人工费 1380 元、机械费 10800 元，单日总费用 12180 元，折算综合单价 6.77 元 /m²；路拌法仅需 2 名操作手、配套 1 台冷再生机、1 台粉料撒布车，单日施工面积可达 2500m²，单日人工费 460 元、机械费 4900 元，单日总费用 5360 元，折算综合单价 2.14 元 /m²。

经计算，路拌法较传统场拌法，直接施工成本降低 56%，单日施工效率提升 40%，同时无需单独修建拌和站，进一步节约临时用地与基建投入，经济优势显著。

4 结语

（1）果王公路沿线的低液限粘土平均塑性指数为 11.7，适宜路拌法施工工艺。在规范落实施工流程与质量管控的前提下，路基压实度可达 94%，CBR 平均值 7.1%，各项指标均满足现行公路工程施工规范。

（2）路拌法综合优势显著：与传统场拌法相比，直接成本降低 56%，施工效率提升 40%，扬尘排放降低 60%、

碳排放量同步降低，且无需修建专用拌和场地，材料利用率明显提高。依托该工艺建成的果王公路收获良好的社会评价，示范作用突出。

（3）路拌法在农村道路路基施工中具有极强的适用性，可有效缓解农村工程资金短缺难题、稳定工程质量，推广应用前景广阔。建议在平原、微丘区同类农村道路项目中优先采用该工艺，同时后续可针对山区等复杂地形，开展路拌法的适应性深入研究。

参考文献：

- [1] 张思远. 乡村振兴视域下农村公路建设与提升策略[J]. 交通企业管理, 2022, 37(1): 95-97.
 - [2] 陈倚乾. 农村公路建设工程质量安全监督与管理要点分析[J]. 低碳世界, 2026, 16(4): 129-131.
 - [3] 翁丹. 加强农村道路建设促进农村经济发展[J]. 现代农村科技, 2024(3): 132-133.
 - [4] 陈生阳. 农村公路建设标准技术掌控与旧道路改造问题分析[J]. 大众标准化, 2023(13): 58-59+62.
 - [5] 林睿. 农村公路建设中路基施工的强夯法加固技术研究[J]. 散装水泥, 2026(1): 14-16.
 - [6] 刘永成. 农村公路建设与养护管理分析[J]. 运输经理世界, 2024(10): 126-128.
 - [7] 张凯. 农村公路建设工程质量安全监督及管理措施[J]. 中华建设, 2025(9): 25-27.
 - [8] 刘路, 武智飞, 邵成龙. 水泥土“路拌法”施工技术研究与应用[J]. 公路, 2020, 65(6): 121-125.
 - [9] 马月申. 公路路面石灰土基层路拌法施工[J]. 交通世界, 2023(10): 129-131.
 - [10] 姚孟龙, 张洪毓, 王嘉志等. 高液限土改良技术中路拌法与场拌法工艺对比分析[J]. 四川建材, 2022, 48(2): 110-111+113.
- 作者简介：龙咏源（1999-），男，湖南娄底人，硕士研究生，研究方向：土木工程施工技术。