

泡沫轻质土路基长期沉降特性监测与分析

杨 朴

江苏现代交通科技有限公司 江苏 南京 210002

【摘 要】：泡沫轻质土作为一种低密度、高流动性的新型路基材料，其长期沉降特性直接关系到道路工程的服役安全。本文系统阐述了泡沫轻质土的物理力学特性与沉降演化机理，综述了传统监测技术与智能监测技术的应用现状，分析了材料组成、施工工艺、环境荷载等多因素对长期沉降的影响规律，并结合高速公路、地铁扩建等典型工程案例探讨了沉降预测模型与控制策略。研究表明，蠕变变形是长期沉降的主要来源，智能监测技术的精度可达亚毫米级，多场耦合模型可有效提升沉降预测准确率。未来发展需聚焦全寿命周期监测、智能化预测及低碳材料创新。

【关键词】：泡沫轻质土；路基沉降；长期监测；蠕变特性；智能感知

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.050

1 引言

泡沫轻质土（是通过将泡沫剂与水泥基浆体混合制备的一种多孔复合材料，具有密度低（ $400\sim1200\text{kg/m}^3$ ）、自立性强、施工便捷等优势，广泛应用于软基处理、台背回填、路基加宽等工程场景。然而，其内部多孔结构导致在长期荷载作用下易发生蠕变变形，可能引发路面开裂、桥头跳车等病害。据统计，某高速公路 FLS 路基在竣工 3 年后沉降量达 82mm，超出规范限值（50mm）64%，修复成本增加约 200 万元。因此，深入研究 FLS 路基的长期沉降特性，建立精准的监测与分析体系，对保障道路工程的安全与耐久性具有重要意义。本文从沉降机理、监测技术、影响因素、预测模型及工程应用等方面展开综述，旨在为 FLS 路基的设计、施工与运维提供理论支撑。

2 泡沫轻质土物理力学特性与沉降机理

2.1 材料组成与结构特征

水泥（强度等级 $\geq\text{P.O}42.5$ ）占比 30%~50%，粉煤灰/矿渣等掺合料可替代 50~60%水泥，降低水化热；阴离子型表面活性剂（如十二烷基硫酸钠），发泡倍数 20 倍，泡沫稳定性 $\geq 30\text{min}$ 。通过扫描电镜（SEM）观察，FLS 内部气泡呈多面体状，平均孔径 1~3mm，孔隙率 40%~60%。气泡壁厚度 50~100 μm ，由 C-S-H 凝胶与未水化水泥颗粒组成，是承载的主要结构单元。

2.2 沉降机理分析

施工期自重应力下的弹性变形，占总沉降 10%~20%，可通过分层填筑控制；固结沉降孔隙水排出引起的塑性变形，持续时间 3~12 个月，与土体渗透性相关；蠕变沉降长期荷载下胶体颗粒滑移导致的不可逆变形，占总沉降 60%~80%，是长期监测的重点。当应力水平超过 0.4 倍抗压强度时，蠕变速率显著增加，需通过限制填筑高度（ $\leq 8\text{m}$ ）降低长期风险。

3 长期沉降监测技术研究进展

3.1 传统监测技术

二等水准测量误差 $\pm 0.5\text{mm/km}$ ，适用于局部沉降监测；

人工观测效率低（单个断面测量需 30min），无法捕捉沉降突变；某 FLS 路基每 20m 设置 1 个监测断面，每月观测 2 次，累计沉降曲线显示竣工后第 2 年沉降速率降至 0.3mm/月。沉降板埋设于路基中心，测量精度 $\pm 1\text{mm}$ ，可监测分层沉降（如 50cm/层）；测斜仪监测侧向位移，精度 $\pm 0.1\text{mm/m}$ ，用于评估路基边坡稳定性；属点式监测，无法反映整体沉降分布，且设备易受施工损坏。

3.2 智能监测技术

3.2.1 合成孔径雷达

星载合成孔径雷达（如 Sentinel-1）通过合成孔径雷达干涉技术（InSAR）进行地面监测，能够提供广泛的监测范围和高精度的地面形变数据。该技术通过分析雷达波反射信号变化，能够测量地表微小形变，尤其在大范围监测中具备显著优势。Sentinel-1 的监测范围广（百公里级），精度高（ $\pm 2\text{mm/年}$ ），在某高速公路 FLS 路基监测中，通过时序 InSAR 技术监测到桥涵衔接段持续的沉降，沉降速率达到 3~5mm/年。通过该数据，相关部门及时采取注浆加固措施，有效防止了可能的结构损坏或安全隐患。Sentinel-1 监测的缺点是受环境因素的影响大，城市区域的相干系数常常低于 0.3，信号反射不清晰，影响监测数据的精度和可靠性。

3.2.2 光纤传感技术

分布式光纤传感技术基于布里渊散射原理，通过监测光纤中不同位置的光信号变化来检测路基沉降情况。光纤传感技术具有高空间分辨率（1~5m）、高精度（ $\pm 0.1\text{mm}$ ）、抗电磁干扰和长期稳定性（ >20 年）等优点，可实时获取路基沉降剖面。在某 FLS 路基项目中，埋设间距 2m 的光纤监测显示，路基中心沉降比边缘大 15%~20%，与有限元模拟结果一致，验证了其监测精度与工程应用价值，可为结构维护提供可靠数据支持。

3.2.3 北斗位移监测

北斗卫星导航系统（BDS）位移监测技术通过基准站、流

动站和数据平台的协同,实现对地面位移的实时监测。静态测量精度达 $\pm 2\text{mm}$,垂直方向为 $\pm 3\text{mm}$,支持毫米级高精度数据获取。在RTK模式下,该技术可连续跟踪交通设施如高速公路、桥梁等的变形与沉降。基准站提供精确参考数据,流动站负责移动监测,数据平台则处理并分析数据以快速反馈信息。此技术特别适合GNSS信号遮挡少的开阔地带,如山区高速公路,确保数据准确性。北斗系统能有效监测路基沉降,及时发现安全隐患,为维护加固工作提供可靠数据支持。

4 长期沉降影响因素与作用机制

4.1 材料参数敏感性

当密度大于 500kg/m^3 时,密度每增加 100kg/m^3 ,抗压强度增加 1MPa 。经研究发现其最佳密度范围为 $550\sim 650\text{kg/m}^3$,在此区间内,既能保证一定的强度需求,又能实现较好的轻量化效果。相较于常规认知,此密度范围下的泡沫轻质土,其蠕变应变会随着密度增加呈现出更平缓的变化趋势,因为在较低密度下,材料内部结构对密度变化的响应更为敏感。例如,在 550kg/m^3 基础上增加 100kg/m^3 至 650kg/m^3 ,蠕变应变降低幅度约为 $8\%\sim 10\%$,这表明合理控制密度对于减少长期蠕变沉降至关重要。

泡沫稳定性同样是影响长期沉降的关键因素。泡沫半衰期从 15min 延长至 45min ,硬化体气孔均匀性指数从 0.6 提升至 0.85 ,沉降差异系数降低 25% 。采用复配泡沫剂(表面活性剂+稳泡剂)可有效提升泡沫稳定性,进而优化材料内部气孔结构,减少因气孔不均匀导致的局部沉降差异。稳定的泡沫体系能够保证气泡在浆体硬化过程中均匀分布,避免因气泡破裂或合并引起的结构缺陷,从而降低长期沉降风险。

4.2 施工工艺影响

在填筑厚度上,建议厚度为 50cm 。由于该泡沫轻质土配比无细砂且不能进行碾压操作,不同于常规需压实材料,填筑厚度直接影响到材料的堆积密实程度和内部应力分布。若填筑厚度直接影响到材料的堆积密实程度和内部应力分布。若填筑厚度过大,材料自重会使下部浆体在未硬化时产生过度变形,影响气泡结构完整性;若厚度过小,则会增加施工成本和时间。 50cm 的填筑厚度是综合考虑材料流动性、硬化速度以及施工效率得出的,既能保证材料在自重作用下自然填充密实,又能维持较好的气泡结构,减少因厚度不当引起的长期沉降。

养护条件对泡沫轻质土的性能发展影响显著。标准养护(温度 $20^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$,湿度 $\geq 95\%$)较自然养护,28d强度提升 18% ,后期沉降速率降低 30% 。在标准养护环境下,水泥水化反应更充分,C-S-H凝胶等水化产物生成量增加,气泡壁强度得以增强,从而有效抑制长期沉降。而在冬季施工时,必须覆盖保温材料,防止早期冻胀开裂。当材料强度达到临界强度 $\geq 1.2\text{MPa}$ 后,方可解除保温措施,否则冻胀产生的冰晶会破坏

气泡壁结构,大幅增加后期沉降量。

5 典型工程案例

5.1 工程概况

扬漂改扩建项目起自镇江南互通,向南经高新区、丹徒区,止于丹徒枢纽,均在镇江市境内,全长 13.081km 。设计速度 120km/h ,路基宽度由 28m 拼宽为 34.5m 。全线共设主线桥梁(含互通主线)12座,主线桥梁全长 2951.457m ,依次分别为:嶂山中桥、龚家湾大桥、山南路框架通道、长山灌渠中桥、姚庄分离式立交桥、官庄大桥、方便分离式立交桥、新G312分离式立交桥、徐吴中桥、凌塘分离式立交桥、小金河大桥、丹徒枢纽主线桥;互通枢纽3处分别为:镇江南互通、上党互通及丹徒枢纽互通。

5.2 监测结果

完工后2025年3月K22+537右幅通道(旧、新)、K22+536.2左幅通道(旧、新)、K26+668.2左幅通道(旧、新)等通道沉降观测点本期沉降量区间为 $0.0\sim 0.3\text{mm}$,累计沉降量区间为 $0.1\sim 3.4\text{mm}$,沉降速率为 $0.0\sim 0.05\text{mm/d}$;K21+416左泡沫土、K21+470右泡沫土、K21+416右泡沫土、K21+560左泡沫土、K21+559.7右泡沫土沉降观测点本期沉降量区间为 $0.2\sim 0.5\text{mm}$,累计沉降量区间为 $10.4\sim 14.7\text{mm}$,沉降速率区间为 $0.03\sim 0.08\text{mm/d}$;观测点沉降速率均小于 5mm/d ,满足施工图设计文件中稳定标准,所观测路基的稳定性良好。

完工后2025年5月基坑顶部竖向位移与水平位移监测数据显示,本期基坑顶部竖向位移监测点沉降量区间为 $0.1\sim 1.2\text{mm}$,累计沉降量区间为 $4.1\sim 5.9\text{mm}$,沉降速率为 $0.1\sim 1.2\text{mm/d}$,监测点的累计水平位移量及沉降速率均在允许范围内,未超过报警值;基坑顶部水平位移区间为 $-2.4\sim -1.5\text{mm}$,累计水平位移量区间为 $-6.6\sim -0.9\text{mm}$,位移速率为 $0.5\sim 2.4\text{mm/d}$,监测点累计水平位移量与水平位移变化速率均未达到报警值。

深层土体位移监测数据显示,深层最大水平位移区间为 $0.198\sim 0.723\text{mm}$,累计位移区间为 $1.774\sim 3.255\text{mm}$,位移速率为 $0.20\sim 0.72\text{mm/d}$,基坑周边土体位移均在允许范围内,未出现异常变形情况。

表1 基坑土体侧向位移监测结果

观测点号	次数	深度(m)	观测结果		
			本次偏移量 mm	累积偏移量 mm	偏移速率 mm/d
CX-1	10	8	0.297	1.801	0.30
CX-2	10	8	0.402	2.923	0.40
CX-3	10	8	0.316	2.593	0.32
CX-4	10	8	0.543	1.774	0.54

CX-5	10	6	0.288	2.604	0.29
CX-6	10	6	0.536	2.895	0.54
CX-7	10	6	0.309	2.161	0.31
CX-8	10	8	0.416	2.974	0.42
CX-9	10	8	0.343	3.255	0.34
CX-10	10	8	0.723	3.117	0.72

地表沉降监测数据显示本期沉降量区间为 0~1.8mm，累计沉降量区间为 2.7~5.9mm，沉降速率为 0~1.8mm/d，地表沉降位移未发现异常情况，各监测点累计沉降值和沉降速率均未达到报警值。

表 2 基坑周边地表沉降监测结果

观测点号	两次观测间隔	本次高程 (m)	观测结果		
			本次沉降(mm)	累计沉降(mm)	沉降速率 mm/d
DB-1	1	32.0410	0.6	4.8	0.6
DB-2	1	32.3033	0.2	4.3	0.2
DB-3	1	31.8604	0.6	5.3	0.6
DB-4	1	31.4954	0.9	5.7	0.9
DB-5	1	30.0174	1.2	5.7	1.2
DB-6	1	30.1742	0.2	5.4	0.2
DB-7	1	30.0303	0.0	4.8	0.0
DB-8	1	30.1634	1.1	5.0	1.1
DB-9	1	32.3184	0.3	4.7	0.3
DB-10	1	30.3599	1.8	5.9	1.8

参考文献:

[1] 全无缝桥梁用掺橡胶粉 LEM-SHCC 路桥连接板拉伸性能及其应用[J].占雪芳;王宪;严亨利;赵怡彬;石缘圆.交通运输工程学报,2022(05).

[2] 发泡水泥泡沫稳定性影响因素及评价方法研究[J].李颖;夏勇.广东建材,2022(07).

[3] 高速公路路基泡沫轻质土拓宽工艺及其变形控制效果分析[J].黄任文;王鑫越;黄俊杰.西部交通科技,2022(04).

[4] 泡沫轻质土在路基加宽中的应用[J].李阳锋.山东交通科技,2022(02).

[5] 高速公路改扩建泡沫轻质土路基分析[J].陶洁.交通世界,2022(09).

5.3 后续完善建议

5.3.1 优化沉降观测协同机制

为保障泡沫轻质土长期沉降监测数据的准确性与完整性，需构建高效的多方协同观测机制。施工单位测量负责人应依据现场填筑进度，严格遵循《工程测量规范》相关要求，在每层泡沫轻质土填筑完成后及时完成沉降观测点的精准埋设。同时建立常态化沟通机制，与检测单位保持密切联系，确保观测点埋设完成后 24 小时内完成接管工作，并及时通知检测单位开展初始值采集。

5.3.2 强化沉降观测点保护措施

鉴于泡沫轻质土施工过程中作业环境复杂，沉降观测点易受破坏，需制定系统化的保护方案。施工单位应在观测点周边采用插设醒目标识旗的方式进行区域划分，标识旗间距不宜大于 2m，且高度应高于作业设备操作面 0.5m 以上，确保观测点位置清晰可辨。同时，在施工前对作业人员及车辆驾驶员开展专项培训，明确观测点保护要求与注意事项，将观测点保护纳入施工安全交底重要内容。一旦观测点发生破坏，施工单位需在 6 小时内完成修复工作，并及时联系检测单位重新进行初始值采集。

6 结论

泡沫轻质土路基的长期沉降特性受材料、施工、环境等多因素耦合影响，蠕变变形是主要控制因素。传统监测技术在局部精度上具有优势，而智能监测技术（如 InSAR、光纤传感、BDS）实现了大范围、实时性监测的突破。通过优化材料组成、加强施工控制及构建智能预测模型，可有效提升路基沉降控制水平。未来需进一步完善全寿命周期监测体系，推动低碳材料与智能化技术的深度融合，为交通基础设施的绿色化、智能化发展提供关键支撑。