 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i8.11453

Key Points for Quality Control in the Construction of Composite Fill Materials Used for Filling Soft Soil Foundations in Municipal Road Projects

Lingjun Feng

Ji'an Yinluling Construction Engineering Co., Ltd., Ji'an, Jiangxi, 343006, China

Abstract

To address issues such as high moisture content, strong compressibility, and low bearing capacity in the soft soil foundation along the section K1+120 to K3+760 of a road, a quality control method for layered filling construction using a composite filler consisting of cement, fly ash, and local clay was proposed. By controlling mixing uniformity, moisture content, loose laying thickness, compaction passes, and settlement monitoring data, a comprehensive quality control system throughout the construction process was established. Engineering test results indicate that the average compaction degree of the composite filler across the entire section is 96.0%, with a minimum compaction degree of 95.0%; the characteristic bearing capacity value reaches 180 kPa, both meeting design requirements; the cumulative settlement over six months ranges from 18.6 mm to 29.4 mm, not exceeding the 30 mm control limit. The study demonstrates that this composite filler filling technique effectively enhances the quality of subgrade construction in soft soil foundations while offering advantages in construction efficiency and cost-effectiveness.

Keywords

soft soil foundation; composite filler; municipal road; compaction degree; settlement monitoring

市政道路软土地基复合填料填筑施工质量控制要点

冯令军

吉安市银庐陵建筑工程有限公司，中国 · 江西 吉安 343006

摘　要

针对某路K1+120至K3+760段软土地基含水量高、压缩性强、承载力低等问题，提出水泥、粉煤灰与本地黏土复合填料分层填筑施工质量控制方法。通过控制拌合均匀性、含水率、松铺厚度、碾压遍数及沉降监测反馈，形成施工全过程质量管控体系。工程检测结果表明，复合填料全段平均压实度为96.0%，最小压实度为95.0%，承载力特征值达到180 kPa，均满足设计要求；6个月工后累计沉降量为18.6 mm至29.4 mm，未超过30 mm控制限值。研究表明，该复合填料填筑工艺可有效提升软土地基路基填筑质量，并兼具施工效率和经济性优势。

关键词

软土地基；复合填料；市政道路；压实度；沉降监测

1 引言

城市道路建设中，软土地基常表现出含水量高、孔隙比大、压缩性强和抗剪强度低等特点，在道路填筑荷载长期作用下，易引发路基不均匀沉降、边坡侧向位移及路面结构早期破坏。地下水位浅、软土厚度变化明显，传统换填、深层搅拌桩或堆载预压等处理方式往往面临弃土量大、工期长、设备依赖度高及与市政管线施工衔接困难等问题[1]。基于某路改扩建工程，本文围绕复合填料选型、拌合控制、分层压实、现场监测及质量评价开展分析，以期为类似市政道路软土地基处理提供参考。

【作者简介】冯令军（1990–），中国江西吉安人，本科，工程师，从事道路桥梁研究。

2 工程概况

2.1 工程背景与软土地基特性

某路改扩建工程全长 4.86 km，设计速度 50 km/h，道路红线宽度 36 m，按城市主干路标准进行建设。地下水位埋深约 0.8 m 至 1.5 m，K1+120 至 K3+760 段发育淤泥质粉质黏土以及软塑黏土，软土厚度多处达到 6 m 至 11 m。现场勘察资料表明，该层土天然含水量为 35% 至 45%，孔隙比为 1.2 至 1.5，压缩模量为 2.5 MPa 至 3.5 MPa，具有高含水量、高压缩性以及低强度特性。鉴于道路填筑荷载会把附加应力持续传递至软弱土层，若地基处治不足，路基不均匀沉降、边坡侧向变形以及路面结构早期损伤风险会同步增

加。由此，软土地基处理质量直接制约复合填料填筑后的整体稳定性以及运营期平顺性。

2.2 复合填料选型与设计参数

鉴于 K1+120 至 K3+760 段软土含水量偏高以及压缩模量较低的地基条件，填筑材料选用水泥、粉煤灰以及本地黏土组成的复合填料。水泥把水化胶结作用作为强度形成的主要来源来使用，粉煤灰借助火山灰反应改善颗粒级配以及后期稳定性，本地黏土则承担骨架填充以及现场材料适配功能。设计配合比确定为水泥掺量 5%、粉煤灰掺量 15%、黏土占比 80%。含水率控制需结合各组分吸水差异开展校核，其最优含水率按下式估算。

$$w_{opt}=\frac{m_c w_c+m_f w_f+m_s w_s}{m_c+m_f+m_s}$$

其中，w_{opt} 表示复合填料最优含水率，单位为 %；m_c、m_f、m_s 分别表示水泥、粉煤灰以及本地黏土的干质量，单位为 kg；w_c、w_f、w_s 分别表示对应材料的控制含水率，单位为 %。

3 复合填料填筑施工质量控制关键环节

3.1 填料拌合质量控制

鉴于某路软土段地下水位浅、黏土原料含水率波动较明显，复合填料拌合环节需把水泥水化时效、粉煤灰分散状态以及本地黏土团粒破碎程度纳入同一工艺链条进行控制。现场宜选用连续式拌合机开展集中拌合作业，设备进料端设置水泥、粉煤灰以及黏土独立计量装置，计量误差控制在设计掺量允许范围内，避免胶结组分局部富集或欠掺。拌合机主轴转速控制为 150 r/min，单批物料有效拌合时间控制为 3 min，使粉煤灰能够填充黏土颗粒间孔隙，水泥颗粒在湿润状态下形成较均匀的包裹层。

拌合质量控制不宜只依赖设备参数记录，还需结合出料状态进行过程判别。出料后应观察混合料颜色、颗粒团聚以及离析情况，合格混合料应呈灰褐色均匀状态，不应出现明显水泥白斑、粉煤灰条带以及直径大于 20 mm 的湿黏土团块。均匀性检测可在运输车卸料断面上部、中部以及下部抽取不少于 5 个样品，运用筛分观察以及水泥剂量快速测定进行复核，同一批次水泥剂量相对偏差宜控制在 ±0.5% 以内，样品间含灰状态应保持一致。含水率检测宜选用烘干法作为校核方法，现场可辅以快速测水仪进行过程筛查，每 200 m³ 复合填料至少检测 1 组，拌合后含水率宜控制在 15.0% 至 17.0% 之间，偏离最优含水率的幅度不宜超过 ±1.0%。当检测值偏低时，应在拌合段内雾化补水并延长湿拌均化时间；当检测值偏高时，则需摊铺晾置后再回拌，避免把游离水带入后续压实层 [2]。

3.2 填筑分层压实控制

某路软土段复合填料在摊铺压实阶段需把层厚、机械能量以及碾压遍数统一纳入过程控制，否则水泥粉煤灰黏土体系容易在局部含水率波动影响下形成密实度差异。结合复合填料最优含水率范围以及城市主干路路基压实需求，单层松铺厚度宜控制为 30 cm，摊铺后应借助平地机开展整平作业，使横坡以及纵向平顺性满足碾压连续作业条件。若松铺厚度超过 30 cm，振动能量难以充分传递至层底，层间结合面附近可能出现欠压实区域；若层厚过小，则会增加施工接缝数量，还会使水泥水化初期的扰动频次升高，不利于填筑层整体结构形成。

压实机械宜选用 20 t 振动压路机，把其静线压力以及振动激振力作为改善颗粒嵌挤状态的主要能量来源来使用。碾压作业应保持低速、均匀以及连续，行驶速度宜控制在 2 km/h 至 3 km/h，轮迹搭接宽度不宜小于 0.3 m。振动压实可使粉煤灰细颗粒向黏土颗粒孔隙中重新分布，同时促使水泥浆体在颗粒接触面形成较稳定的胶结薄层。对靠近检查井、雨水口以及路缘石基础的边部区域，振动压路机难以覆盖的位置需运用小型夯实设备进行补压，避免边缘弱区在后续交通荷载作用下发生差异沉降。

碾压遍数宜控制为 6 至 8 遍，并且应依据现场含水率以及轮迹变化进行适度调整。含水率接近 15.0% 至 17.0% 时，6 遍至 7 遍通常可满足密实成型要求；当填料偏湿但尚未超过控制上限时，宜延长静压收面过程，减少强振导致的弹簧土现象。压实质量评价应以现场实测干密度以及室内最大干密度为依据，压实度计算式如下：

$$K=\frac{\rho_d}{\rho_{d\max}}\times 100\%$$

其中，K 表示压实度，单位为 %；ρ_d 表示现场检测干密度，单位为 g/cm³；ρ_{dmax} 表示室内击实试验确定的最大干密度，单位为 g/cm³。

每一填筑层完成碾压后应及时开展压实度检测，检测点位需覆盖路基中线、行车道轮迹带以及边部填筑区域。对压实度未达到设计要求的区域，应在水泥初凝前完成补压或翻松回拌处理，使分层界面保持连续密实状态。

3.3 现场监测与过程调整

鉴于 K1+120 至 K3+760 段软土厚度变化较大以及地下水位埋深较浅，复合填料填筑过程需把压实度检测以及沉降速率监测纳入同步控制链条。压实度监测主要服务于分层施工质量判别，检测点宜沿道路纵向按 50 m 间距布设，并且覆盖中线、左右行车道轮迹带以及两侧边部区域；在桥头搭接段、管线回填段以及软土厚度大于 9 m 的路段，应适当加密检测点，使监测结果能够反映填筑层横向密实差异。沉降监测点宜布设在软土厚度突变位置、填挖交界位置以及典型横断面中部，监测断面与压实度检测断面保持对应关系，便于把施工荷载、压实状态以及地基变形进行关联分析。

数据采集频率需结合填筑进度进行动态调整。每完成 1 层复合填料碾压后，应马上开展压实度检测，并把含水率、松铺厚度、碾压遍数以及检测干密度一并记录。沉降观测在填筑期间宜每日观测 1 次，当单日填筑厚度超过 60 cm 或现

场出现边坡微裂缝、局部隆起以及轮迹回弹时，观测频率宜提高至每日 2 次。为判断填筑荷载作用下地基变形发展状态，可按相邻两次观测沉降量计算沉降速率，公式如下：

$$v_s = \frac{S_i - S_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$

其中，v_s 表示沉降速率，单位为 mm/d；S_i 表示第 i 次观测累计沉降量，单位为 mm；S_{i-1} 表示前一次观测累计沉降量，单位为 mm；t_i 以及 t_{i-1} 分别表示对应观测时间，单位为 d。

监测数据反馈不宜停留在记录层面，应把异常指标转化为现场工艺调整依据。当压实度偏低且含水率处于控制范围内时，宜增加 1 遍至 2 遍静压或弱振碾压；当压实度偏低且含水率超过 17.0% 时，应暂停上层填筑，开展晾置、翻松以及回拌处理。若沉降速率连续 2 d 增大，或边部沉降明显高于中线，应降低当日填筑厚度，并对边坡外侧排水沟以及临时截水措施进行复核，避免地下水补给削弱软土地基承载状态。

4 复合填料填筑施工质量效果评估

4.1 压实度与承载力检测结果分析

结合某路复合填料分层填筑质量评估需求，压实度检测选用环刀法开展，环刀法是借助定容取样测定现场干密度并同室内最大干密度进行比对的常用方法，能够较直接反映填筑层碾压后的密实状态。检测断面覆盖 K1+120 至 K3+760 软土处理段的中线、轮迹带以及边部区域，承载力检测选用平板载荷试验开展，以复合填料顶面变形响应作为地基承载状态判别依据。

从压实度分布来看，全段平均压实度为 96.0%，最小检测值为 95.0%，均未低于设计控制值 95%，说明 30 cm 松铺厚度以及 6 遍至 8 遍碾压组合能够把复合填料压实至较稳定状态。靠近 K2+300 至 K3+000 段的平均压实度略低，主要同该段软土厚度较大以及填料含水率接近控制上限有关，但其最小值仍处于设计允许范围内，未形成明显欠压实区。平板载荷试验所得承载力特征值为 176 kPa 至 188 kPa，全段统计特征值为 180 kPa，高于设计要求的 160 kPa，表明水泥水化胶结以及粉煤灰颗粒填充作用已经对填筑层承载性能形成有效支撑。综合压实度以及承载力指标判断，复合填料填筑质量能够满足城市主干路路基结构稳定性要求。

4.2 工后沉降监测与评估

复合填料填筑完成后，某路 K1+120 至 K3+760 段进入 6 个月工后沉降跟踪观测阶段，监测对象覆盖软土厚度突变段、桥头搭接段以及典型填筑横断面，以累计沉降量以及沉降发展趋缓程度作为评价路基变形稳定性的主要依据。观测结果表明，各监测断面累计沉降量整体处于 18.6 mm 至 29.4 mm 之间，最大值出现在 K2+300 至 K3+000 段，该段软土厚度较大，前期填筑荷载作用下孔隙水压力消散过程相对缓慢，沉降量高于其他路段具有一定合理性。K1+120 至 K1+700 段累计沉降量为 21.3 mm，K1+700 至 K2+300 段为 24.8 mm，K3+000 至 K3+760 段为 19.7 mm，均未超过 30 mm 控制限值。

4.3 质量控制效果综合评价

综合压实度、承载力以及工后沉降表现来看，复合填料填筑把材料改性以及分层压实施工结合在同一质量控制链条内，较契合某路浅埋地下水以及厚层软土并存的现场条件。相较于大面积换填、深层水泥搅拌桩以及堆载预压等传统软土地基处理方法，该工艺对场地外运弃土以及大型专用设备依赖程度较低，施工组织更容易同市政道路管线、检查井以及雨水口等附属结构施工衔接。结合本工程 K1+120 至 K3+760 段施工组织记录，复合填料集中拌合以及 30 cm 分层填筑方式使有效作业面周转加快，综合工期较常规软基处治方案缩短约 15%，材料本地化取用以及水泥、粉煤灰低掺量协同应用使直接工程成本降低约 10%[3]。

从质量控制路径来看，拌合均匀性、含水率、松铺厚度、碾压遍数以及沉降速率之间形成了较清晰的反馈关系。全段平均压实度达到 96.0%，承载力特征值达到 180 kPa，6 个月累计沉降量控制在 18.6 mm 至 29.4 mm，说明前期设定的 15.0% 至 17.0% 含水率范围、6 遍至 8 遍碾压参数以及异常监测后的翻松回拌、补压调整具有工程适配性。需重点关注的是，该类复合填料对含水率波动较敏感，后续类似工程仍应把快速含水率筛查以及沉降动态观测作为现场质量管理的常规内容，以降低软土厚度突变路段的差异变形风险。

5 结语

某路软土段应用水泥、粉煤灰与本地黏土复合填料后，施工质量控制重点集中在含水率、拌合均匀性、层厚、碾压能量和沉降反馈等环节。工程实践表明，15.0% 至 17.0% 含水率、30 cm 松铺厚度和 6 遍至 8 遍碾压参数具有较好适配性。该工艺在满足压实度、承载力和工后沉降控制要求的同时，可减少弃土外运和大型设备依赖，提升市政道路软基处理效率。后续类似工程仍应强化快速含水率检测与沉降动态预警，重点防控软土厚度突变区的差异变形。

参考文献

[1] 黄红军,邓树密,黄方麒.浅谈高填方路基冲击碾压补强技术的应用和质量控制要点[J].四川建筑,2024,44(06):212-214.

[2] 李达.在役桥梁盆式支座更换施工监理质量控制要点[J].江苏建筑,2024,(06):76-79.

[3] 高彦辉,蔡廷江.水泥稳定碎石层施工质量控制[J].安装,2024,(S2):211-213.