

# 建筑垃圾复合改良填料在城市道路路基中的应用研究

孙宏亮<sup>1</sup>, 张强<sup>2</sup>, 张昕<sup>1</sup>, 潘鑫<sup>1</sup>, 王小东<sup>1</sup>, 李振辉<sup>1</sup>

[1. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000; 2. 中国建筑一局(集团)有限公司西北分公司, 陕西 西安 710000]

**摘要:** 为解决城市建筑垃圾消纳压力大、路基填料资源短缺的双重问题, 依托西安曲江CBD汉口街工程, 探究建筑垃圾在城市道路路基中的应用技术。结合道路现状、地质条件及设计要求, 选用改良型换填法, 以“建筑垃圾+素土+石灰”为复合改良填料进行研究。通过现场试验段分层填筑和压实度检测, 结果发现复合改良填料能达到设计压实度要求, 表明改良填料能有效改善建筑垃圾物理性质; 路基施工过程中和施工完成后, 对地基承载力、压实度、弯沉值等关键指标的检测显示, 各项指标均满足设计要求, 结果表明复合改良填料可用于路基填筑。该方案实现了建筑垃圾的资源化利用, 减少了弃运污染与资源消耗, 提升了工程经济性, 为同类城市道路路基处理工程提供了技术参考。

**关键词:** 路基; 建筑垃圾; 复合改良填料; 地基承载力; 压实度; 弯沉值

中图分类号: U416.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0083-05

## Research on Application of Construction Waste Composite Modified Filler in Urban Road Subgrade

SUN Hongliang<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>2</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, PAN Xin<sup>1</sup>, WANG Xiaodong<sup>1</sup>, LI Zhenhui<sup>1</sup>

[1. Xi'an Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China; 2. China Construction First Division (Group) Co., Ltd., Northwest Branch, Xi'an 710000, China]

**Abstract:** To address the dual challenges of intense pressure on the disposal of urban construction waste and a shortage of subgrade filling materials, relying on the Hankou Street Project in the Qujiang CBD of Xi'an, the application technology of construction waste in the subgrade of urban roads is explored. In light of the current road conditions, geological features and design requirements, a modified replacement and filling method is adopted for the research with a composite modified filler consisting of construction waste, plain soil and lime. Through layered filling and compaction degree detection in the on-site test section, the results show that the composite modified filler can meet the design requirements for compaction degree, indicating that the modified filler can effectively improve the physical properties of construction waste. During and after the subgrade construction, the detection of key indicators such as foundation bearing capacity, compaction degree and deflection value shows that all indicators satisfy the design specifications, which proves that the composite modified filler is applicable for subgrade filling. This scheme realizes the resource utilization of construction waste, reduces the pollution caused by waste transportation and the resource consumption, improves the economic efficiency of the project, and provides a technical reference for similar subgrade treatment projects of urban roads.

**Keywords:** subgrade; construction waste; composite modified filler; foundation bearing capacity; compaction degree; deflection value

## 0 引言

在老城区更新改造中, 往往会因为拆旧建新产生较多的建筑垃圾。根据预测, 我国城市建筑垃圾

在2025年将达到40亿t, 大约占城市垃圾总量的40%以上, 其主要来源包括旧建筑拆除(占60%)、新建建筑施工(超1/3)和装修环节。建筑垃圾具有成分复杂、产量大、处理难度大等特征, 其主要成分包括无机物(混凝土块、沥青块、砖渣等)、有机物(塑料、木材等)以及少量有害物质(重金属等)。

大量建筑垃圾的堆积和运输弃运带来的环境影

收稿日期: 2026-01-12

作者简介: 孙宏亮(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事城市道路、交通设计工作。

响和经济成本是巨大的,因此在片区改造中,能否对建筑垃圾进行利用成为影响城市环境和片区开发成本的重要因素<sup>[1]</sup>。

## 1 工程概况

### 1.1 区域概况

西安曲江中央文化商务区位于西安市东南角,总开发面积约290 hm<sup>2</sup>,以西安市南绕城高速为界分为北区和南区,其中北区已基本开发完成,南区正在开发,开发范围内原多为村庄和厂房。在项目初期,南区范围内堆放了大量拆除现状建筑后的垃圾,区域内整体地势为北低南高,中间存在一条东西向的坎,坎上坎下高差约6 m。

### 1.2 设计概况

为尽量减少区域内的土方开挖量,满足填挖平衡,本次高程布置采用坎下多填方和坎上多挖方的形式,建成后区域内南北向高程布置较为平缓。

汉口街为区域内一条南北向城市次干路,全长约1.4 km。本次设计道路全长约0.2 km,道路全段为一条直线,全段纵坡为3%,道路范围内均为填方,最大填方约为5 m,填方边坡坡率采用1:1.5,道路红线宽为48 m,四幅路,双向6车道,断面布置为:4.5 m人行道+4.5 m非机动车道+3 m侧分带+10.5 m机动车道+3 m中央分隔带+10.5 m机动车道+3 m侧分带+4.5 m非机动车道+4.5 m人行道。机动车道为69 cm厚沥青混凝土路面。

### 1.3 地质情况

各层土的野外特征分述如下:

(1)杂填土( $Q_4^m$ ):主要由砖瓦碎块等建筑垃圾组成,含少量黏性土,成分杂乱,土质松散不均匀,层厚1.40~4.90 m。

(2)素填土( $Q_4^m$ ):主要由黏性土组成,含少量砖块、灰渣,土质疏密不均匀,层厚0.80~1.10 m。

(3)黄土( $Q_3^{col}$ ):褐黄色,大孔结构,可见虫孔,偶见蜗牛壳、零星钙质结核,可塑~硬塑状态,以硬塑状态为主,具湿陷性,层厚6.40~6.90 m,此层天然含水率为16.3%~27.5%。

(4)黄土以下为古土壤。

勘察期间,全部勘探点均见到了地下水,量测的稳定水位深度为8.00~18.60 m,位于古土壤与黄土分界处。

道路纵断面和地质地层结合情况见图1。从图1可以看出,道路均为填方路段,且道路原状地面线以

下还存在1.5~4.5 m杂填土与素填土。

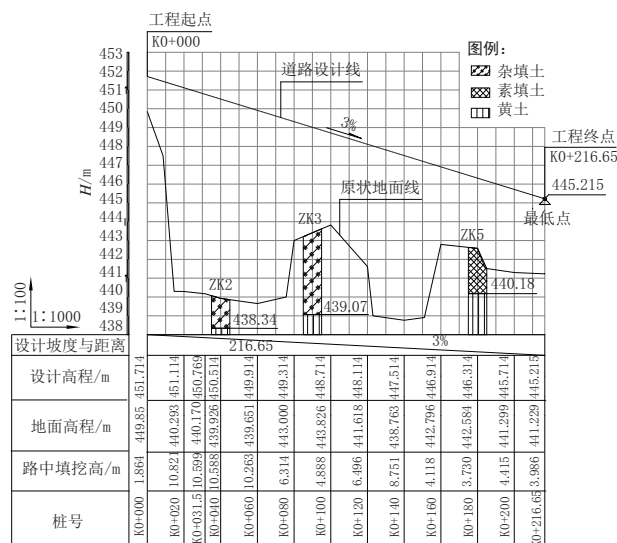


图1 道路纵断面和地质地层结合图

## 2 处理方案分析对比与设计方案

### 2.1 处理方案分析对比

道路范围内建筑垃圾处理的常用方法包括换填法、强夯法、石灰桩法和孔内深层强夯法。

#### (1)换填法

换填法是将路基范围内的杂填土或素填土更换为工程性质好的土(素土、石灰土、砂土等),采用分层压实的方法达到地基承载力的要求。由于换填成本较高,此种方法常适用于杂填土厚度较小、施工方便的项目。

#### (2)强夯法

强夯法是利用夯锤自由落体的能量对路基进行夯实,不同的夯击能对于路基的夯实效果是不同的,有效的加固深度也是有差异的。工程实例显示,在单击夯击能为8 000 kJ·m时,对于粗颗粒土(砂土、碎石土)的有效加固深度约为10 m,对于细颗粒土(黏性土等)的有效加固深度约为9 m。由于强夯法产生较大的震动,因此一般适用于项目周边比较空旷的区域<sup>[2]</sup>。

#### (3)石灰桩法

石灰桩法是在杂填土层中间隔设置石灰土桩,利用石灰桩的支撑作用和石灰桩对周边土体的挤密作用,大大提高杂填土层的密实度和承载力,一般适用于杂填土深度较厚的项目,其桩径和桩间距可根据地质情况确定<sup>[3]</sup>。

#### (4)孔内深层强夯法

孔内深层强夯法是在杂填土层中间隔设置碎石

桩,利用碴土桩的支撑作用和碴土桩对周边土体的挤密作用,提高杂填土层的密实度和承载力。碴土桩的填料为土、混凝土块、石料等无机混合物,可利用旋挖成孔挖出来的杂填土,但需要对其中的有机物进行去除。孔内深层强夯法适用情况与石灰桩基本一致,但由于对杂填土的利用和弃土较少,其成本较石灰桩低<sup>[4]</sup>。

由于本项目道路设计范围内均为填方,且在项目施工前文物部门需要开挖道路至黄土层进行文物勘探,因此本项目适宜采用换填法对路基进行分层回填处理。

2.2 设计方案

项目设计时提出了两种路基换填方案。

方案一为在路基底部设置 40 cm 8% 石灰土层,然后采用素土分层回填压实至路床顶面以下 40 cm,最后在路床顶面设置 40 cm 8% 石灰土层。

方案二为在路基底部设置 40 cm 8% 石灰土层,然后采用建筑垃圾掺素土并掺石灰(掺灰量 8%,质量比)的复合改良填料分层回填压实至路床顶面以下 40 cm,最后在路床顶面设置 40 cm 8% 石灰土层。与素土拌和的建筑垃圾粒料应充分分筛、破碎,其中建筑垃圾质量应为总质量的 30%~40%(颗粒含量根据现场试验段铺筑情况可适当调整),最大粒径不超过 10 cm,最小粒径大于 2 mm。路床范围路基填料最小强度(CBR)不小于 4%,路床以下不小于 3%,有机质含量不超过 5%,杂物含量不超过 1%<sup>[5]</sup>。改良后的回填料压实度不小于 95%,路床顶面以下 40 cm 处地基承载力须达到 160 kPa。

管道施工采用反开挖法,填土需要满足管线专业设计要求。

方案一需要购入大量素土进行分层回填,且需要将道路范围内建筑垃圾进行清运,对城市环境有一定的影响,投资较大;方案二利用了周边建筑垃圾,购入较少的素土进行分层回填,降低了素土购入、建筑垃圾清运的成本,避免了建筑垃圾清运对城市环境的影响,降低了成本。综合考虑,采用方案二为本次设计方案。

3 工程实验及检测结果分析

3.1 工程实验

考虑到片区内建筑垃圾成分的复杂性,本次设计提出以建筑垃圾的掺量百分比为范围值,施工时需要对建筑垃圾的掺量进行实验确定,也为未来此

片区内其他道路的施工提供经验。

本次共设置两组实验,每组实验长 100 m,实验层位于 40 cm 8% 石灰土层上,实验的变量为建筑垃圾掺量,详见表 1。

表 1 实验分组表

| 实验组              | 建筑垃圾掺量(质量比)/% |
|------------------|---------------|
| ①(K0+000~K0+100) | 30~35         |
| ②(K0+100~K0+200) | 35~40         |

项目施工时分层铺设素土、处理后的建筑垃圾和灰土,总松铺厚度为 30 cm,然后采用路拌机充分拌合(至少往返拌合两遍),之后采用 22 t 钢轮压路机和 22 t 羊角碾碾压,碾压工艺需要满足相关施工规范要求,实验总铺设厚度为 1.5 m。

3.2 检测结果分析

根据以上设计要求进行施工,施工碾压工艺满足相关规范要求,碾压完成后对实验段进行检测。主要检测指标为压实度,结果见表 2、表 3<sup>[6]</sup>。

表 2 实验组①压实度检测 results 表

| 桩号     | 设计压实度/% | 压实干密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 最佳含水率/% | 压实度/% |
|--------|---------|-----------------------------|-----------------------------|---------|-------|
| K0+025 | ≥95     | 1.74                        | 1.832                       |         | 95    |
| K0+050 |         | 1.75                        | 1.832                       | 15.1~   | 95    |
| K0+075 |         | 1.76                        | 1.832                       | 15.9    | 96    |
| K0+100 |         | 1.75                        | 1.832                       |         | 95    |

表 3 实验组②压实度检测 results 表

| 桩号     | 设计压实度/% | 压实干密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 最佳含水率/% | 压实度/% |
|--------|---------|-----------------------------|-----------------------------|---------|-------|
| K0+125 | ≥95     | 1.75                        | 1.841                       |         | 95    |
| K0+150 |         | 1.76                        | 1.841                       | 14.6~   | 95    |
| K0+175 |         | 1.77                        | 1.841                       | 15.4    | 96    |
| K0+200 |         | 1.76                        | 1.841                       |         | 95    |

检测资料显示,建筑垃圾掺量在 30%~40% 之间均能达到设计的压实度要求,表明改良填料能有效改善建筑垃圾物理性质。本次道路路基最终采用的建筑垃圾掺量为 35%~40%,可多利用现状建筑垃圾并减少素土购入,降低对城市环境的影响,并提高工程经济性。

4 施工检测分析

4.1 地基承载力检测

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012),本次采用静荷载试验对路床顶面以下 40 cm 处地基承载力进行检验。根据规范要求<sup>[7]</sup>,本次共选取 3 处点位进行了静载试验,均位于车行道上且均等分布。检测结果详见表 4。

表4 地基承载力试验结果汇总表

| 试验<br>点号 | 压板直径/<br>m | 加压级<br>别/kPa | 终止压<br>力/kPa | 沉降量/mm  |         |
|----------|------------|--------------|--------------|---------|---------|
|          |            |              |              | 160 kPa | 320 kPa |
| T1       | 1.120      | 40           | 320          | 5.92    | 17.11   |
| T2       | 1.120      | 40           | 320          | 5.83    | 17.94   |
| T3       | 1.120      | 40           | 320          | 5.62    | 16.99   |

其中T2点试验数据详见表5,根据此进行*p-s*及*s-lgt*曲线的绘制(见图2、图3)。

表5 T2点地基承载力试验数据

| 荷载/kPa | 本级沉降/mm | 累计沉降/mm |
|--------|---------|---------|
| 0      | 0.00    | 0.00    |
| 40     | 1.41    | 1.41    |
| 80     | 1.41    | 2.82    |
| 120    | 1.17    | 3.99    |
| 160    | 1.63    | 5.62    |
| 200    | 1.78    | 7.40    |
| 240    | 2.42    | 9.82    |
| 280    | 3.51    | 13.33   |
| 320    | 3.66    | 16.99   |

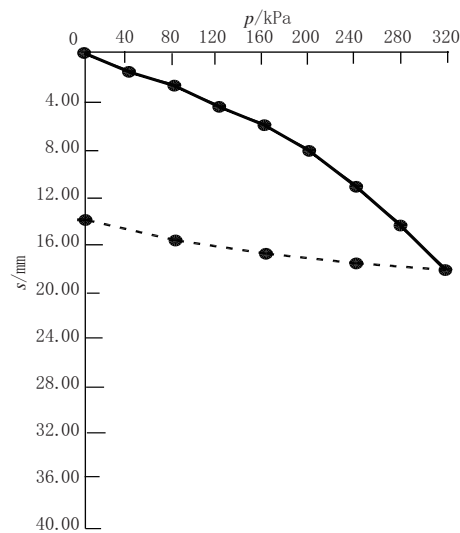


图2 荷载试验*p-s*曲线

本次试验总沉降量介于16.99~17.94 mm之间,3个点均未达到终止试验要求的沉降值( $s/b=0.06$ ,  $s=67.2$  mm)。由图2可以看出,*p-s*曲线呈缓变型,*s-lgt*曲线每级沉降量变化无明显陡降,承载力均未达到极限状态<sup>[8]</sup>。

按《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015)表5.4.3,取 $s/b=0.008$ (压板直径 $b=1.12$  m),即 $s=8.96$  mm时对应的压力,其值不应大于最大试验荷载的一半,以此为原则来确定各试验点承载力特征值。由此确定各荷载试验点承载力特征值为160 kPa,满足设计要求<sup>[9]</sup>。

4.2 路床顶面检测

为了保证路基的均匀性和稳定性,本次在路床

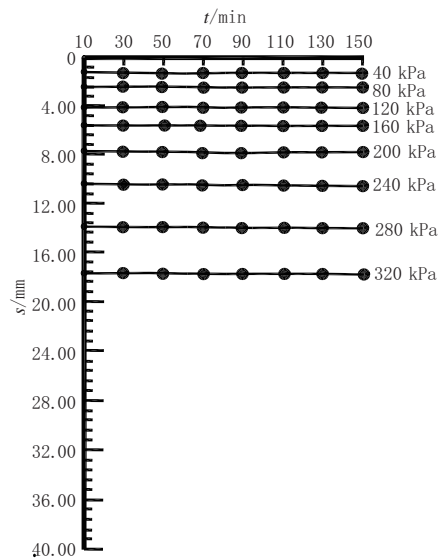


图3 荷载试验*s-lgt*曲线

顶面设置了40 cm石灰土(含灰量8%),控制其顶面主要的检测指标为压实度和弯沉值。

(1)压实度

路床施工完后对路床顶面进行压实度检测,检测结果见表6。

表6 路床顶面压实度检测结果统计表

| 桩号     | 设计<br>压实度/% | 压实干密度/<br>( $g\cdot cm^{-3}$ ) | 最大干密度/<br>( $g\cdot cm^{-3}$ ) | 压实度/% |
|--------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|
| K0+030 | $\geq 95$   | 1.675                          | 1.745                          | 95    |
| K0+090 |             | 1.658                          | 1.745                          | 95    |
| K0+140 |             | 1.710                          | 1.745                          | 96    |
| K0+200 |             | 1.693                          | 1.745                          | 95    |

试验结果显示,路床顶面压实度均大于设计要求的95%,满足设计要求。

(2)弯沉值

本次设计路床顶面弯沉值为248.4(0.01 mm),弯沉检测结果见表7<sup>[10]</sup>。

表7 路床顶面弯沉检测结果统计表

| 桩号     | 设计弯沉值/<br>0.01 mm | 等效贝克曼梁/<br>0.01mm | 贝克曼梁<br>标准差 | 贝克曼梁代表<br>值/0.01 mm |
|--------|-------------------|-------------------|-------------|---------------------|
| K0+020 | 248.4             | 119.8             | 17.6        | 153.7               |
| K0+040 |                   | 115.8             |             |                     |
| K0+060 |                   | 105.8             |             |                     |
| K0+080 |                   | 142.0             |             |                     |
| K0+100 |                   | 159.1             |             |                     |
| K0+120 |                   | 137.1             |             |                     |
| K0+140 |                   | 110.0             |             |                     |
| K0+160 |                   | 148.1             |             |                     |
| K0+180 |                   | 141.6             |             |                     |
| K0+200 |                   | 132.1             |             |                     |

经计算,贝克曼梁算数平均值为129.9(0.01 mm),采用 $L_B=a+b\times L_{FWD}$ 公式进行计算<sup>[11]</sup>,弯沉结果显示路

床顶面弯沉代表值为 153.7(0.01 mm),小于设计弯沉值 248.4(0.01 mm),满足设计要求。

### 5 结 语

通过对常用路基处理方案进行比较,结合本次道路现状和设计情况,最终选择了对环境影响小、工程经济性好的改良型换填法对道路路基进行处理。研究结果如下:

- (1)本项目提出采用“建筑垃圾+素土+石灰(掺灰量 8%,质量比)”的复合改良填料对路基进行填筑,通过试验和压实度检测,结果发现复合改良填料能达到设计压实度要求,表明改良填料能有效改善建筑垃圾物理性质。
- (2)采用复合改良填料填筑完成后,对其顶面进行了承载力检测,检测结果达到设计值,之后对路床顶面进行检测,其压实度、弯沉值均达到设计要求,结果表明改良复合填料可用于路基填筑。
- (3)采用复合改良填料对路基进行填筑,可有效利用区域内的建筑垃圾,减少建筑垃圾的弃运量和

外购素土量,从而降低工程投资,避免弃运建筑垃圾带来的环境污染,保障了道路运行的安全性与稳定性。

### 参考文献:

[1] 周志军.土石混填路基压实质量控制方法研究[D].西安:长安大学,2006.

[2] 龚晓南.地基处理手册(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.

[3] 张昕,易磊.城市道路杂填土路基处理方法研究与应用[J].城市道桥与防洪,2018(11):57-60.

[4] CECS 197—2006 孔内深层强夯技术规程[S].

[5] T/CMEA 5—2020 建筑垃圾再生集料道路应用技术规程[S].

[6] 胡其志,袁海峰,潘诚文,等.基于沉降率控制的土石混填路堤压实质量研究[J].中外公路,2014,34(3):1-5.

[7] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S].

[8] JGJ 340—2015 建筑地基检测技术规范[S].

[9] 孙宏亮,潘鑫,刘艳妮,等.孔内深层强夯法在城市道路路基杂填土处理中的应用研究[J].城市道桥与防洪,2024(9):187-190.

[10] 郝永鹏.土石混填路基病害成因分析与施工质量控制[J].交通科技,2017(3):23-26.

[11] JTG 3450—2019 公路路基路面现场测试规程[S].

(上接第 62 页)

[10] HU H, WANG J J, DONG C Z, et al. A hybrid method for Damage Detection and Condition Assessment of Hinge Joints in Hollow Slab Bridges using Physical Models and Vision-based Measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 183(15): 109631.

[11] GONG Y C, QU C X, YI T H, et al. A theoretical analysis method of transverse modal shapes of hollow slab bridge with hinge joint damage[J]. Structures, 2023, 56: 104832.

[12] ZHAO J Q, ZHAN J W, WANG C, et al. A dynamic stiffness-based two-step method for damage identification of joints in hinged slab bridges using support vector machine[J]. Structures, 2023, 58: 105657.

[13] 高庆飞,宋洪雨,张坤,等.空心板梁桥铰缝破坏机理精细化有限元分析[J].公路工程,2021,46(1):205-213.

[14] 仲轩阳,陈成勇,孔思宇,等.组合多箱梁桥横向分布系数计算研究[J].世界桥梁,2025,53(5):84-90.