

“双碳”背景下建筑再生料固化稳定土在道路底基层中的应用研究

钱卫祺

(上海闵行城市建设投资开发有限公司, 上海市 201100)

摘要: 在国家“双碳”目标提出的大背景下, 各行各业都在积极探寻实现绿色环保及可持续发展的创新路径。在工程建设行业, 也都在竞相开展各项绿色创新技术, 提升工程环保性和低碳性。以某公路项目为案例, 尝试通过应用新材料、新工艺, 对建筑再生料固化稳定土底基层技术方案进行实践研究。试验结果显示: 建筑再生料固化稳定土段的弯沉平均值为 56.9 (0.01 mm), 远小于普通固化稳定土段弯沉的 93.1 (0.01 mm)。经济技术分析也表明建筑再生料固化稳定土底基层具有明显的价格优势, 比水泥稳定碎石单价低 30~40 元/m³, 不仅能大幅降低工程造价, 还能简化施工程序、有效缩短工期, 因此该技术是一项环保低碳、施工简便、经济可靠的技术方案, 有一定的应用价值。研究成果望能为道路工程建设的绿色转型拓展思路, 并积累经验。

关键词: 固化土; 经济技术分析; 道路底基层; 双碳背景; 建筑再生料

中图分类号: U416.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)05-0253-05

Research on Application of Building Recycled Material Solidified Stabilized Soil in Road Base under Dual-carbon Background

QIAN Weiqi

(Shanghai Minhang Urban Construction Investment and Development Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

Abstract: Under the background of the national double-carbon goal, all industries are actively exploring the innovation path of green environmental protection and sustainable development. In the engineering construction industry, various green technology innovations are competitively carried out to enhance the environmental protection and low-carbon nature of the project. Taking a highway project as an example, by trying the application of new materials and new processes, the practical research on the technical scheme of building recycled material to solidify and stabilize the soil bottom base is carried out. The test results show that the average deflection of the solidified stable soil section of the building recycled material is 56.9 (0.01 mm), much smaller than the 93.1 (0.01 mm) of the ordinary solidified stable soil section. The economic and technical analysis also shows that the solidified stable soil subbase of building recycled materials has the obvious price advantages, and is 30~40 yuan/m³ lower than the unit price of cement stabilized gravel, which can not only significantly reduce the engineering cost, but also simplify the construction procedures and effectively shorten the construction period. Therefore, this technology is an environmentally friendly, low-carbon, simple construction, economical and reliable technical scheme, and has certain application value. The research results are expected to expand ideas and accumulate experience for the green transformation of road engineering construction.

Keywords: solidified soil; economic and technical analysis; road subbase; dual-carbon background; recycled building material

0 引言

伴随着我国经济社会的高速发展, 城镇基础设施建设规模也迎来了飞速的增长。各项工程的建设在为经济发展提供助力的同时, 也对社会环境发展

带来了负面影响。道路工程作为城镇基础设施中的重要组成部分, 其在施工过程中产生的资源消耗及环境影响等问题也越来越受到人们的关注。我国在 2020 年基于推动自身可持续发展及构建人类命运共同体的双重驱动下, 公布了碳达峰和碳中和的目标愿景。在这样的大背景下, 各行各业都纷纷在探索绿色环保、可持续发展的创新之路。在道路工程领域, 围绕“双碳”目标也开展了大量的技术研究, 聚焦

收稿日期: 2024-05-27

作者简介: 钱卫祺(1982—), 男, 硕士, 高级经济师, 从事工程项目管理工作。

于复合土体利用的固化土技术就是其中重要的一个细分领域。但现有的固化稳定土的研究大部分是应用于道路路基或是应用于农村机耕路的路面,作为道路基层或底基层的应用研究较少。而将建筑再生料加入固化稳定土中,进一步提升资源再利用效率、优化固化稳定土配比的应用研究更是罕见。

本文通过在道路工程建设领域实践“低碳”经济理念,尝试分析论述将建筑再生料固化稳定土技术应用于道路底基层的可行性及其推广价值。

1 工程背景

在上海市某高速公路入城段抬升改造工程中,为尽可能减少工程施工对既有高速公路车辆通行的影响,在抬升改造前,计划在现状公路两侧先行实施保通道路。保通道路全长 3.5 km,为东西两侧布置,总计面积约 55 000 m³。保通道路大部分处于高速公路两侧的防护绿化带内,绿化带部位绝大部分为早期回填土,回填时的土源比较杂乱,土质较差。保通道路投入使用后,行车荷载较大、车流量密集、车行速度也较快,对保通道路结构的质量要求较高。

为积极响应“双碳”行动号召,推动行业技术创新,项目参建各方充分讨论,邀请专家专题论证后,决定尝试将固化稳定土技术应用于保通临时道路底基层,代替传统的水泥稳定碎石底基层。

2 建筑再生料固化稳定土技术原理

固化稳定土是把有机或无机材料按照一定比例做成固化材料与土进行拌和、在常温下直接胶结土壤颗粒或与粘土矿物化学反应生成凝胶物质、再把松散软弱的土体变成整体性较好和强度较高的土工材料。目前使用较多的固化剂材料有无机类、聚合物类和电离子类三类,国内外对固化稳定土的应用大多集中在道路路基领域。

本文应用的建筑再生料固化稳定土,是通过在无机类复合固化剂的固化稳定土中掺入一定比例的建筑再生料得到的。这里的建筑再生料主要指生活类建筑装修时产生的垃圾固体废物,如瓷砖、石膏板、玻璃、水泥砂浆、红砖、木料等等,这类建筑固体废物被集中收集起来,进行分解破碎化处理形成不同粒径的颗粒物,再被均匀掺加至固化稳定土中;建筑再生料的加入,能增加固化剂与土壤及再生料分子间的结合力,提高复合土的承载力和抗剪强度,并降低

土的塑性,增加密度、减弱渗透性,使沉淀速率加快,大大延长其崩溶时间。固化后的稳定土随着土体水分的排出和土体骨架的压实,其强度将再度增长,并且具有较好的水稳定性。

3 试验段方案

我国高等级道路一般都采用半刚性基层,其整体强度、板体性和抗变能力都较优秀。对于半刚性基层,国内通常采用水泥稳定碎石或粉煤灰三渣混合料,上海地区则多采用水泥稳定碎石作为基层材料。保通道路标准参照二级公路,原先的基层设计方案为“上基层+底基层+垫层”,具体布置为:20 cm 水泥稳定碎石+20 cm 水泥稳定碎石+15 cm 级配碎石。本次试验段拟采用的基层形式为:20 cm 水泥稳定碎石+20 cm 固化稳定土。即采用 20 cm 的固化稳定土底基层代替 20 cm 的水泥稳定碎石基层,并基于固化稳定土在物理强度、水稳定性和抗渗性等方面的性能优势,在满足各项设计要求的情况下,考虑取消级配碎石垫层的配置,可使路面整体厚度减少 15 cm,如表 1 所列。

表 1 原设计方案与试验段方案对比表

方案类型	结构形式	结构组成	厚度/cm
原设计方案	上基层+底基层+垫层	20 cm 水泥稳定碎石+20 cm 水泥稳定碎石+15 cm 级配碎石	55
试验段方案	上基层+底基层	20 cm 水泥稳定碎石+20 cm 固化稳定土的结构形式	40

试验段范围为东侧保通道路桩号(EK2+523~EK2+660)段,总长 137 m、平均宽度为 12 m。为对比建筑再生料固化稳定土与普通固化稳定土效果的区别,在试验段现场布置了对比分区。其中建筑再生料固化稳定土长度为 55 m(EK2+535~EK2+590),普通固化稳定土长度为 70 m(EK2+590~EK2+660),如图 1 所示。



图 1 固化稳定土试验段平面图

为确保试验段路基的质量,统一在路基顶 30 cm 掺入 6% 石灰土进行补强,补强宽度为 13.5 m。经实测,石灰土路基试验段弯沉平均值为 111.3(0.01 mm),最大值为 125(0.01 mm),最小值为 98(0.01 mm),且两对比组分区的石灰土路基质量情况基本相当。

4 固化稳定土施工工艺及试验效果

4.1 施工工艺流程

本次建筑再生料固化稳定土施工工艺流程主要包括:施工准备→撒布固化剂→拌合→摊铺整型→碾压→养生。

对比组普通固化稳定土施工工艺流程主要包括:施工准备→一次撒布固化剂→拌合→二次撒布固化剂→拌合→摊铺整型→碾压→养生。

4.2 施工主要材料

主要材料准备:固化剂、土壤、建筑再生料。

建筑再生料固化稳定土固化剂经比选确定选用无机类粉状复合固化剂,复合固化剂与土壤中各类成分产生化学结晶效应、物理聚合效应等反应,使得土壤内部形成空间网络状三维晶体骨架结构,从而改变土壤的工程力学性能,如提高土壤的抗压强度、抗折强度以及抗剪强度,降低土壤的塑性,减少土壤的渗透性等。选取的复合固化剂细度 ≤ 20 、密度 $\geq 2.5 \text{ g/cm}^3$ 、初凝时间 $\geq 45 \text{ min}$ 、终凝时间 $\leq 48 \text{ h}$ 。固化剂掺量经现场试验得出最佳掺量控制标准,如表 2 所列。

表 2 固化剂最佳掺量表

土(重量比)/ %	固化剂掺量/ %	含水量/ %	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
100	6	13	1.715

土壤:土壤主要利用现状原防护绿化带中的粉质土,施工前土壤含水量控制在 22% 以内。

建筑再生料:采用 50% 建筑再生料+50% 粉质土的比例,再生料粒径为 5~12 mm 和 15~25 mm 两类各 50%。

对比组采用的是固化稳定土施工中常用的电离子类水性固化剂,它带有比水中正离子更高的正电荷,可破坏水与土矿物之间的电化键,进而取代土矿物周围的水分并形成保护层,自由水分经重力、碾压及蒸发后被排出。一旦水分被排出,黏土颗粒会凝聚,增加土层的密度及抗剪强度。这一过程是不可逆的,因此可实现对土层的永久性加固。

主要施工机械准备:冷再生机 1 台,用于拌和摊铺;平地机 1 台,用于固化土料的初平和精平;22 t 单缸轮压路机 1 台,用于碾压成型;轮式压路机 1 台,用于终碾及表面纹理处理;洒水车 1 台,用于洒水。

4.3 施工控制重点

建筑再生料固化稳定土施工的控制重点:(1)撒

布固化剂按 25 kg/m^2 的量控制;(2)通过冷再生机进行拌合,拌合次数为 2 次,拌和幅宽为 2.3 m,第一次拌和压实厚度 20 cm,纵向接缝处相邻两幅作业面的重叠不小于 10 cm;(3)摊铺整型需压路机静压一遍,再用平地机在快速初平 2 遍,最终成形的土层要求无明显轮迹和集料离析现象;(4)在摊铺整型完成后应立即进行碾压,并遵循先轻后重、先静后动的原则进行,且需在固化剂初凝前完毕;(5)应洒水并覆盖土工布进行维养,覆盖时间不低于 3 d,并保持土工布表面湿润。

对比组施工工艺采用常规固化土施工工艺,其施工控制重点不再展开描述。

4.4 试验效果

试验段的道路底基层表面平整、密实,整体板结效果良好。经施工完成 50 d 后的检测,其固化稳定土试验段压实度和弯沉值如表 3 所列,均符合设计要求。其中建筑再生料固化稳定土段弯沉平均值为 56.9 (0.01 mm),普通固化稳定土段弯沉平均值为 93.1 (0.01 mm)。

表 3 试验段弯沉值汇总表

桩号	EK2+540	EK2+550	EK2+560	EK2+570	EK2+580		
固化稳定土底基层	38	48.7	78	53.7	66		
	建筑再生料固化稳定土段长度为 55 m (EK2+535~EK2+590)						
桩号	EK2+590	EK2+600	EK2+610	EK2+620	EK2+630	EK2+640	EK2+660
固化稳定土底基层	88	90.3	93.7	76.7	100	97.7	105.3
	普通固化稳定土段长度为 70 m (EK2+590~EK2+660)						

5 经济技术分析

5.1 造价分析

造价测算采用上海市市政定额计价,价格参考当月信息价,相关费率参照《沪建市管(2016)42 号》文件^[6]执行,无对应信息价的参照市场平均价格,其中固化剂按 1 500 元/t,建筑垃圾再生料按 80 元/t 计列。因施工工艺类似,建筑垃圾固化土参照就地水泥再生基层定额修改,替换了部分材料及机械;水泥稳定碎石及级配碎石直接套用定额计算,计算结果如表 4 所列。

从三类底基层的造价测算结果来看,水泥稳定碎石基层造价最高,建筑再生料固化稳定土造价次之,普通固化稳定土造价最低。总体上看,两类固化稳定土底基层都比水泥稳定碎石底基层造价低不少,

表 4 造价对比表

底基层处理 方案	水泥稳定碎石及 级配碎石	建筑再生料 固化稳定土	普通固化 稳定土
	20 cm 水稳+15 cm 级配碎石	20 cm 建筑再生 料固化稳定土	20 cm 固化 稳定土
造价对比 (不含规税)	114 元/m ² +45 元/m ²	80 元/m ²	50 元/m ²

且固化稳定土底基层还可以取消级配碎石垫层的设计,如果算上垫层的差价,固化稳定土底基层的价格优势将更加明显。

5.2 工艺技术分析

实测数据如表 5 所列,可见建筑再生料固化稳定土基层及普通固化稳定土基层的技术指标均能达到本设计的最低要求,基本可作为本次道路的底基层来使用。但从最终效果上看,建筑再生料固化稳定土的各项技术指标都要优于普通固化稳定土,从弯沉值到初期抗压强度上都体现出了更佳的工程性能。

表 5 技术指标对比表

类型		水泥稳定碎石 (设计要求值)	建筑再生料固 化稳定土	普通固化 稳定土
弯沉 值	最大	—	90(0.01 mm)	110(0.01 mm)
	最小	—	20(0.01 mm)	56(0.01 mm)
	平均	≥113(0.01 mm)	56.9(0.01 mm)	93.1(0.01 mm)
压实度/%		≥96	≥96	≥96
最大干密度/ (g·cm ⁻³)		2.5	1.54	1.83
7 d 无侧限抗压 强度/MPa		≥2.0	2.1	2.0

5.3 综合效益分析

结合本次试验段的经验,并从施工工期、双碳视角、技术适应性、工程投资等方面综合考虑,对水泥稳定碎石、建筑再生料固化稳定土及普通固化稳定土三种底基层工艺进行综合效益的比较,如表 6 所列。

表 6 综合效益对比表

类型		水泥稳定碎石	建筑再生料固化稳定土	普通固化稳定土
施工工期	施工准备期	准备期短	准备期较短,虽对土壤含水量有要求,但将较干燥的建筑再生料拌入到含水率较高的土体中,达到施工需要的最佳含水率较快	对土壤含水量有要求,原状土可能需要翻晒,准备期可能较长
	现场作业期	作业期短,可大面积流水施工	作业期短,可大面积流水施工	作业期短,可大面积流水施工
	养生期/d	7~15	3	7
双碳视野下的技术比较	原材料本身环保性	水泥生产中要消耗大量的煤炭资源并释放大量的二氧化碳温室气体,加剧了全球温室效应	固化剂无毒无污染	固化剂无毒无污染
	施工期环境影响	施工期间可能产生一定的扬尘及噪音	施工期间可能产生一定的扬尘及噪音	施工期间可能产生一定的扬尘及噪音
	建筑废料利用	可部分利用再生料代替碎石	大量利用建筑废料	未利用建筑废料
	天然石料的资源节约使用	需使用石料	可减少石料的开采,保护生态	可减少石料的开采,保护生态
适应性对比	原状土的利用	无法利用	可利用	可利用
	适用区域	适用大部分地区,对场地土质无要求	适用大多数土质,尤其对含水量较高的土壤能缩短施工工期	适用大多数土质
	主要适用场景	各类道路的基层、底基层	一般道路的底基层、路基	一般道路的底基层、路基
	其他要求	无	适用于有建筑废料资源化集中处理能力的地区	无
投资对比	基层	高	中	低
	垫层	高	无	无
	土方外运	需外运,成本较高	原土利用,成本低	原土利用,成本低
	整体投资	高	中	低

具体结论如下:水泥稳定碎石基层作为最常用的底基层材料,从工艺成熟度、适用范围的广度上来看,都具有很明显的优势;而相对而言,固化稳定土底基层材料在适用性上有所局限,但其在环境影响、资源节约的环节中却有着较大的优势,非常符合“双碳”背景下工程技术的发展方向,尤其是建筑再生料固化稳定土

技术在资源循环利用上有显著的特点。除了有利于“双碳”目标的实现外,采用建筑再生料固化稳定土技术应用于道路底基层还具有一定的技术经济可行性。不仅能大幅降低工程造价,而且还能简化施工程序、有效缩短工期,在缺乏工程石料的地区或现场大量土方需外运处理的道路工程中,有广阔的应用前景。

6 结 语

经过对本次试验段的实践,对建筑再生料固化稳定土技术在道路底基层中的应用总结如下。

(1)从道路工程项目建设上而言:首先是本技术能减少施工过程中场地的占用,可以直接将原状土原位利用起来;其次可以有效减低工程成本,减少碎石垫层采购及土方外运成本,且工期的压缩也有利于成本的控制;此外,从本次试验的各项数据上看,本技术应用后的工程质量已接近传统的水泥稳定碎石底基层,其中建筑再生料固化稳定土段的弯沉平均值为56.9(0.01 mm),远小于普通固化稳定土段的93.1(0.01 mm),对其具备一定的替代性。经济技术分析也表明建筑再生料固化稳定土底基层具有明显的价格优势,比水泥稳定碎石单价低30~40元/m³,不仅能大幅降低工程造价,还能简化施工程序、有效缩短工期;但本技术适用的工程场景仍有一定局限性,质量性能上限也不如水泥稳定碎石高,故不建议应用于高等级道路的底基层。

(2)从推动“双碳”目标实现的角度上看:本技术的应用可以促进道路工程与环境协调发展,使道路工程建设更加绿色节能、低碳环保。通过对建筑废料的大量利用,践行了资源再循环、再利用的可持续

发展理念;对工程范围内原有的大量废弃工程渣土的利用,减少了渣土外运及堆放产生的多次环境污染;另外通过“以土代石”的方式减少了工程对砂石料用量,减轻了“开山取石”对自然环境的破坏影响。通过这些技术特点与举措,可以使道路工程的整体环保水平得到显著提升。

(3)最后,本技术具备更大范围的推广价值,后续还需通过更多项目的实践应用,才能更全面地验证技术效果与完善工艺流程,比如进一步比较不同土壤条件、温度条件下施工的性能变化,或是研究建筑再生料不同粒径搭配下的固化稳定土强度变化等。希望通过更多的应用研究,尽快形成一套成熟和可复制的技术标准。

参考文献:

- [1] 油新华,徐良平,平洋,等.双碳背景下岩土工程绿色建造理念与技术实践[J].建筑技术,2022,53(6):773-776.
- [2] JTG/T F20—2015,公路路面基层施工技术细则[S].
- [3] 王睿翔,宣兆云,张涛,等.线性工程中绿色低碳环保理念的实践探索——以中国电科成都产业基地一期配套道路工程为例[J].工程技术研究,2022,7(6):19-21.
- [4] 吕炎.浅谈绿色施工理念在市政工程施工中的运用[J].工艺技术,2021(1):54-57.
- [5] SHA2-31—2016,上海市市政工程预算定额[S].
- [6] 上海市建筑建材业市场管理总站.关于实施建筑业营业税改增值税调整本市建设工程计价依据的通知:沪建市管(2016)42号[R].上海:上海市建筑建材业市场管理总站,2016.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

