

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2022.08.053

改性淤泥质土路用性能应用研究

吴世兴

(甘肃省白银公路事业发展中心, 甘肃 白银 730900)

摘要: 随着我国基础建设不断完善, 道路交通建设覆盖范围不断扩大, 遇到土体问题多样化, 在道路工程施工中遇到的淤泥质土问题日益增多。淤泥质土由于其自身流动性较强, 不具备承载力等特点, 一直以来难以被有效运用到工程实际中, 同时又因存储和运输等问题导致其难以长距离运输, 成为一个难以解决的问题。就淤泥质土的改良为出发点, 以同样难以运输与存储的工业废弃原料为掺料, 作为淤泥质土固化剂, 找到能够改良淤泥质土特性的最优配比, 将其作为公路路基填料, 具有良好应用前景。通过混料试验研究发现: 选取高炉矿渣、粉煤灰、电石渣三种掺量比值为 42.1 : 11.5 : 46.4 可以很好满足公路路基填土要求。

关键词: 淤泥质土; 固化剂; 公路路基

中图分类号: TU447

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)08-0198-04

0 引言

我国幅员辽阔, 江河湖泊众多, 在漫长的地质演变过程中, 产生难以计数的淤泥质土。然而随着我国建设发展, 环境改造活动不断进行, 填海造陆活动与河道清淤工程清理出大量淤泥质土。由于淤泥质土自身特性, 使其难以得到有效利用, 而运输与堆放成本高昂又导致其经济价值低下。故需掺入一定量的固化剂以提高其自身强度, 从而能够改变淤泥质土的特性, 再将其作为工程用土投入使用。邵玉芳^[1]对太湖清淤工程中产生的三种代表性淤泥质土进行了土坡固化剂加固室内试验, 筛选出了合适的固化剂品种。魏华彬^[2]对 HAS 土壤固化剂进行室内实验研究, 结合现场施工介绍了 HAS 土壤固化剂在淤泥改性做路基的性能特点, 及其在实际应用中的可行性和优越性。王新岐^[3]利用施工现场开挖的淤泥质土, 添加适量固化剂, 通过室内试验与现场实测数据互相验证, 成功实现对淤泥质土的固化利用。郑少午^[4]通过将疏浚淤泥与 EPS 颗粒混合作为轻质土路基填料, 不仅可以处理大量废弃淤泥, 而且消耗掉废弃 EPS 与多种工业废物, 具有良好的工程运用前景与示范意义。张德军^[5]通过对掺入 HSC301 的淤泥质土进行 CBR 性能测试, 发现掺入固化剂的土壤强度明显提高。陆晓义^[6]在淤泥中掺入废弃的玉米秸秆纤维、水泥、石灰等, 作为添加剂固化淤泥, 通过室内

试验验证其满足公路路基填土要求。景啸^[7]通过对宁波西洪大桥试验段进行试验和观测, 提出软土地区就地加固软弱地基及废弃淤泥质土(泥浆)固化后用于路基填料的技术和成套工艺, 对软土地区弃土资源化利用、实现土方平衡具有广泛的推广价值。

本文选用三种不同工业废料进行固化淤泥质土, 通过混料试验方法研究能使淤泥质土产生最佳固化效果的配比, 有效利用不良地质土和工业废料的同时, 达到路基填土要求并降低施工成本。

1 材料选取

以往对淤泥质土固化多采用化学添加剂与石灰或水泥混合作为固化剂, 然而这些原料获取困难, 且价格昂贵, 难以大范围使用。而我国工业发展迅速, 每年产生大量工业废弃物难以完全处理, 造成巨大环境负担与经济问题。因此, 本文将工业废弃物掺入淤泥中作为固化剂, 研究符合公路路基填土要求的固化方案。

1.1 选取试验土

淤泥质土本身含水率高达 54%, 一般采用直接晾干进行脱水, 待含水率降低到一定程度后方可进行固化, 以此达到装卸运输或参与工程填土的目的。然而当含水率过低时土体会联结, 掺入固化剂难以搅拌均匀, 以致强度分布不均匀, 难以形成有效的承载特性; 此外, 土体与工业废料结合, 需等待发生化学反应之后才能达到效果, 过少的水不利于正常的化学反应进行, 导致难以达到预期效果, 因此需要将含水量控制在一个合适的范围。经过前期考察, 选取含水率为

收稿日期: 2021-11-22

作者简介: 吴世兴(1972—), 男, 学士, 高级工程师, 从事道路与桥梁相关研究工作。

35%作为最优含水率。

1.2 选取固化材料

(1) 高炉矿渣

我国基础设施建设蓬勃发展,钢材需求量高居不下,钢铁行业俨然成为我国支柱性产业,高炉冶炼工艺是钢铁冶炼的常用工艺。我国每年由于钢铁冶炼产生大量的工业矿渣,这些矿渣成分复杂,难以降解,随意堆放不仅会占用大量空间而且会对土体与环境造成污染。就如何安全无害的处理这些矿渣已经成为一道难题,经分析检测,高炉矿渣主要包含CaO、Al₂O₃等氧化物,这些物质有助于改善土体力学性能,在增强稳定性的同时亦可提高强度。

(2) 粉煤灰

在煤炭燃烧过程中形成的粉末状颗粒,多为火力发电厂燃煤后产生的剩余废弃物。火力发电目前作为我国的供电主力,离不开燃烧煤炭,大量燃烧煤炭势必产生粉煤灰。粉煤灰颗粒细小,容易对人和其它动物造成健康危害,同时长期堆放不仅占用空间而且会造成环境污染。经化学分析发现,粉煤灰中主要化学成分包括Al₂O₃、SiO₂,对改善土体力学性质具有一定的增益作用,张景富^[8]通过使用电子显微镜研究发现,粉煤灰本身具有火山灰活性,但没有胶凝性,只有在碱性和类似高炉矿渣的激活物下激发下才能具有活性,主要配合高炉矿渣进行火山灰反应。

(3) 电石渣

我国每年生产和消耗大量的电石,随之也产生大量的电石渣,电石渣的处理与存储是长期以来难以解决的问题。经分析发现,电石渣主要成分包括Ca(OH)₂,在水中呈碱性,以一定比例掺入到淤泥质土中可以提升固化土的强度与稳定性。

2 试验方法与试件制作

2.1 试验方法

对于固化材料的配方设计,常见的设计方法有正交试验设计、响应面法设计和混料试验设计^[9]。对比发现,正交试验所需工况最多,响应面法需考虑单独掺量的影响,而混料试验设计能够在变量较少时以较少的试验组别获得最优配比,适合作为本文设计方法。混料试验设计分析变量较少,设计试验组别不多,在使用分析数据建立变量之间的方程关系时得到的高阶回归方程较为准确。本分析研究仅含高炉矿渣、粉煤灰和电石渣三种变量,通过混料试验考察各种掺料含量与试验指标的关系。

设高炉矿渣含量、粉煤灰含量、电石渣含量分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 ,对应土体无侧限抗压强度为 y ,建立 y 与 x 的回归关系。约束条件如式(1):

$$\left. \begin{aligned} x_i &\geq 0, i=1, 2, 3 \\ x_1 + x_2 + x_3 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据掺量配比不同,拟合得到 y 与 x 的回归方程如式(2):

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i < j} r_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{i < j < k} b_{ijk} x_i x_j x_k \quad (2)$$

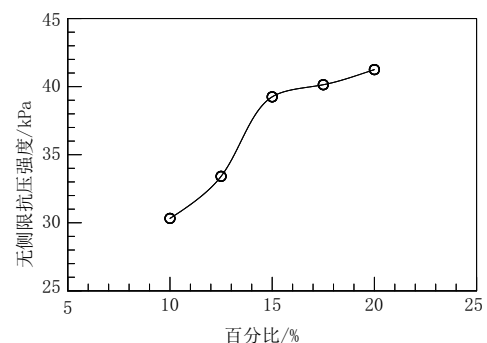
式中: b_i 为 x_i 的一阶系数; b_{ij} 与为 $x_i x_j$ 交互作用的二阶系数; r_{ij} 为 $x_i x_j$ 交互作用的三阶系数; b_{ijk} 为 $x_i x_j x_k$ 交互作用的三阶系数^[10]。

由于使用这几种工业废料作为固化剂产量的相关研究较少,需进行预实验确定其最优掺量所在范围。试验假定三种固化剂掺入比例相当,分别掺入10%、12.5%、15%、17.5%、20%,测量改良后土体在养护7 d和14 d后无侧限抗压强度。试验结果如表1。

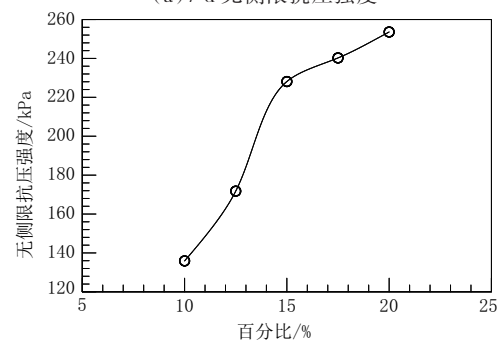
表1 预试验结果

| 掺量% | 7 d 强度 /kPa | 14 d 强度 /kPa |
|------|-------------|--------------|
| 10 | 30.32 | 135.89 |
| 12.5 | 33.41 | 171.75 |
| 15 | 38.12 | 228.11 |
| 17.5 | 40.14 | 240.27 |
| 20 | 41.25 | 253.61 |

为便于找到合适范围,绘制曲线如图1所示。



(a) 7 d 无侧限抗压强度



(b) 14 d 无侧限抗压强度

图1 预试验结果曲线图

由图分析可得,龄期越长固化土的强度越高,且会随着掺量的增加强度增高。当掺量从 12.5%增加到 15%时,无侧限抗压强度增加最明显,且在 14 d 龄期下达到 220 kPa 以上,能够满足需要。故本试验采用 15%的掺量作为固化剂的掺入量,之后进行试验,具体试验见表 2。

表 2 试验工况设计

| 工况 | x_1 | x_2 | x_3 | A | B | C |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 15.00 |
| 2 | 0.67 | 0.17 | 0.17 | 10.00 | 2.50 | 2.50 |
| 3 | 0.33 | 0.67 | 0.00 | 5.00 | 10.00 | 0.00 |
| 4 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 15.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5 | 0.67 | 0.00 | 0.00 | 10.00 | 5.00 | 0.00 |
| 6 | 0.17 | 0.67 | 0.67 | 2.50 | 2.50 | 10.00 |
| 7 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| 8 | 0.00 | 0.33 | 0.33 | 0.00 | 10.00 | 5.00 |
| 9 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 15.00 | 0.00 |
| 10 | 0.00 | 0.67 | 0.67 | 0.00 | 5.00 | 10.00 |
| 11 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 2.50 | 10.00 | 2.50 |
| 12 | 0.67 | 0.33 | 0.33 | 10.00 | 0.00 | 5.00 |
| 13 | 0.33 | 0.67 | 0.67 | 5.00 | 0.00 | 10.00 |

注:表中 A、B、C 分别代表三种掺量真实含量, x_1 、 x_2 、 x_3 分别代表三种掺量的相对百分含量。

2.2 试样制作

按照计算比例称量各掺量,将其混入处理含水率后淤泥质土中,搅拌均匀后制作标准试件,试件直径 39.1 mm、高 80 mm。将模具中的试样抽真空并在水中养护 24 h,拆模后密封放入养护室进行养护。试件制备如图 2 所示。



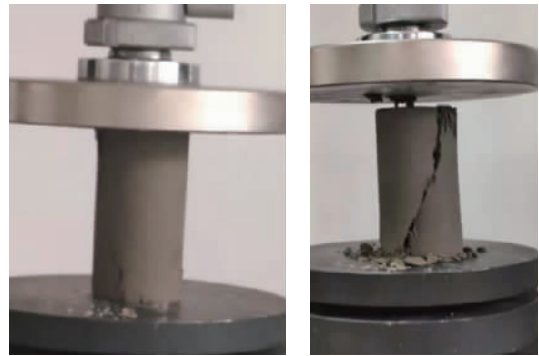
(a) 试验所用设备 (b) 试件密封养护
图 2 试件制备

养护至规定龄期后进行无侧限抗压强度测试,试验如图 3 所示。

3 试验结果分析

由第 2 节试验所得结果见表 3。

由表可知,三种掺量在养护龄期较短时其无侧限抗压强度值均较小,而随着龄期不断增加,其无侧限抗压强度值随之增大,表明三种掺量在养护时间较短时强度不高,随着养护时间增长,其强度值增



(a) 试验前 (b) 试验后

图 3 无侧限抗压强度试验

表 3 试验结果

| 工况 | 7 d 强度 /kPa | 14 d 强度 /kPa | 28 d 强度 /kPa |
|----|-------------|--------------|--------------|
| 1 | 13.23 | 76.84 | 142.67 |
| 2 | 14.78 | 721.64 | 982.16 |
| 3 | 13.03 | 25.21 | 46.64 |
| 4 | 11.42 | 25.91 | 66.88 |
| 5 | 12.16 | 15.67 | 63.34 |
| 6 | 17.83 | 145.64 | 1 135.64 |
| 7 | 36.59 | 247.37 | 943.64 |
| 8 | 15.62 | 68.73 | 115.94 |
| 9 | 7.95 | 9.28 | 9.83 |
| 10 | 13.61 | 69.64 | 372.61 |
| 11 | 37.64 | 106.84 | 255.16 |
| 12 | 78.64 | 519.64 | 1 024.00 |
| 13 | 41.64 | 262.88 | 1 227.03 |

大。分析其原因,淤泥质土含水率可能仍过高,较短时间内固化剂无法与水充分发生反应,即使生成胶凝物质也由于土体仍处于塑性状态,无法有效提高强度。

龄期为 7 d 时,由式 3 可得模型回归方程为:

$$y_{7d} = 11.23x_1 + 7.90x_2 + 9.34x_3 + 6.32x_1x_2 + 261.97x_1x_3 + 17.76x_2x_3 - 2708.33x_1x_2x_3 + 6076.7x_1^2x_2x_3 - 4630.27x_1x_2^2x_3 \quad (3)$$

通过计算可得,当 $x_1=0.519$, $x_2=0.243$, $x_3=0.238$ 的时候,改良后土能够达到最大强度 91.29 kPa,经转化可得高炉矿渣、粉煤灰、电石渣含量分别为 7.78%、3.65%、3.57%。由于淤泥改良土的应用场景为公路路基填土,其应强度达到 800 kPa。在龄期 7 d 时无法满足要求,故还需更长的养护时间。

龄期为 14 d 时,由式 4 可得模型回归方程为:

$$y_{14d} = 29.02x_1 + 22.12x_2 + 86.34x_3 + 26.9x_1x_2 + 2227.97x_1x_3 + 120.5x_2x_3 + 33832.72x_1^2x_2x_3 - 13301.84x_1x_2^2x_3 \quad (4)$$

通过计算可得,当 $x_1=0.517$, $x_2=0.144$, $x_3=0.339$ 的时候,改良后土能够达到最大强度 826.46 kPa,经

转化可得高炉矿渣、粉煤灰、电石渣含量分别为7.75%、2.16%、5.09%。此时强度可以达到要求,但考虑实际施工有可能存在搅拌不均匀以及含水率不达标等问题,仍需较长养护时间才能够满足要求。

龄期为28 d时,由式5可得模型回归方程为:

$$y_{28d} = 48.53x_1 + 10.96x_2 + 207.56x_3 + 219.77x_1x_2 + 4550.13x_1x_3 + 712.38x_2x_3 + 22105.52x_1^2x_2x_3 - 18269.35x_1x_2^2x_3 + 25373.37x_1x_2x_3^2 \quad (5)$$

龄期为28 d时,通过计算可得,当 $x_1=0.421, x_2=0.115, x_3=0.464$ 的时候,改良后土能够达到最大强度1 479.32 kPa,经转化可得高炉矿渣、粉煤灰、电石渣含量分别为6.32%、1.72%、6.96%。此时强度完全满足要求。

综上所述,将不同龄期最优配比汇总,见表4。

表4 不同龄期最优配比

| 龄期 | 高炉矿渣 /% | 粉煤灰 /% | 电石渣 /% | 最大强度 /kPa |
|------|---------|--------|--------|-----------|
| 7 d | 7.78 | 3.65 | 3.57 | 91.29 |
| 14 d | 7.75 | 2.16 | 5.09 | 826.46 |
| 28 d | 6.32 | 1.72 | 6.96 | 1 479.32 |

将各不同龄期下掺料含量进行分析,做出曲线图可以更加直观分析不同养护龄期下各掺量百分比含量的影响程度,如图4所示。

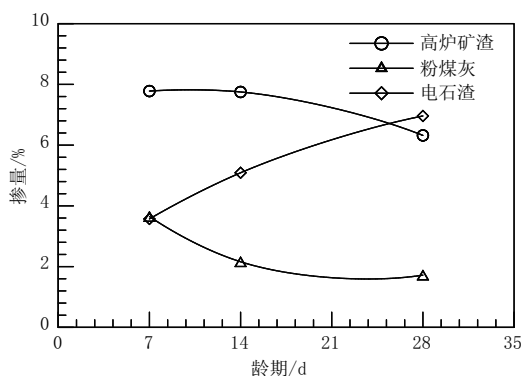


图4 最优配比曲线图

分析曲线图发现,在三个掺料配比最优龄期下,养护龄期较短时,粉煤灰掺量较高,随着养护龄期增加,粉煤灰含量逐渐减少,究其原因,粉煤灰中主要物质在固化土早期强度中发挥重要作用,而随着龄期不断增加,固化土强度的提高更依赖于 SiO_2 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的作用,因此,电石渣的含量随着龄期增长也随之增

高,这种现象也说明 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在养护龄期后期发挥着重要作用。鉴于本文主要研究淤泥改良土对路用性能的研究,以28 d养护龄期作为最优参考,即可得到高炉矿渣、粉煤灰、电石渣三种掺量所用比值为42.1 : 11.5 : 46.4,此比例可以在28 d养护龄期下可以获得最高的强度。

4 结论

本文选取高炉矿渣、粉煤灰、电石渣作为新型掺料对淤泥质土进行固化改良,并通过混料设计试验确定不同龄期下最优掺料配比,得到以下结论:

(1)选用前人较少使用的工业废料作为固化土改良剂,并通过对三种不同龄期试验无侧限抗压强度值进行测量,在混料设计试验下,拟合三阶回归方程得到相应龄期的最优配比。

(2)结合工程实际,确定在28d龄期下,选取高炉矿渣、粉煤灰、电石渣三种掺量比值为42.1 : 11.5 : 46.4可以很好满足公路路基填土要求。

参考文献:

- [1] 邵玉芳.太湖清淤工程淤泥质土改良试验研究[C]//2005年中国农业工程学会学术年会论文集.北京:中国农业工程学会,2005:316-318.
- [2] 魏华彬,张爱华,孙开武,等.淤泥质土改性做路基应用研究[J].湖南交通科技,2006(4):31-32,40.
- [3] 王新岐.节能减排新技术在滨海新区道路工程中的应用研究[J].城市道桥与防洪,2011(10):132-137,12.
- [4] 郑少午,陈亮,赵旭航,疏浚淤泥与EPS颗粒混合轻质土路基填料的试验研究[J].路基工程,2015(2):71-76.
- [5] 张德军,卢世英,刘文超.高效节能岩土治理新技术在道路工程中的应用[J].节能,2019,38(10):51-52.
- [6] 陆晓义,张小虎,徐雨,等.秸秆改性淤泥质土路用性能可行性研究[J].住宅与房地产,2019(31):210,230.
- [7] 景啸.建筑弃土在道路工程中资源化利用关键技术[J].城市道桥与防洪,2021(4):34-38,11.
- [8] 张景富,丁虹,代奎.矿渣-粉煤灰混合材料水化产物、微观结构和性能[J].硅酸盐学报,2007(5):633-637.
- [9] 徐日庆,徐丽阳,段景川.软黏土微观结构形貌与定量分析影响因子优化[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(8):2723-2729.
- [10] 朱坤垠.淤泥质土固化及路用性能试验研究[D].杭州:浙江大学,2021.