



低碳地聚合物固化处理疏浚淤泥 力学性能试验研究*

王锌鑫，江朝华，孙逸琳，冯明，蔡伟泰

(河海大学 港口海岸与近海工程学院，江苏南京 210098)

摘要：河道疏浚产生的大量废弃疏浚淤泥须有效处置，而传统水泥固化剂为高能耗、高碳排放材料，与当今生态理念不符。以矿粉为主要原料、硅酸钠为碱激发剂制备新型低碳地聚合物胶凝材料固化淤泥作为工程填料，进行地聚合物固化土力学性能、压缩特性等性能检测及分析。结果表明：与10%水泥掺量的固化土相比，10%矿粉掺量的地聚合物固化土28 d无侧限抗压强度提高406.1%，破坏形式由塑性破坏转变为弹性破坏，应力-应变曲线有明显的应力峰，能更好地满足作为普通填方土材料的需要，具有良好的生态效益和广阔的应用前景，可为疏浚废弃物的资源化利用提供有效途径。

关键词：地聚合物；无侧限抗压强度；固化土

中图分类号：U 616

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)08-0040-05

Experimental study on mechanical property of dredged silt treated by low carbon geopolymer

WANG Xin-xin, JIANG Chao-hua, SUN Yi-lin, FENG Ming, CAI Wei-tai

(College of Harbor, Coastal and offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A large amount of abandoned dredged silt generated by river dredging needs to be effectively disposed of, while the traditional cement curing agent is a material with high energy consumption and high carbon emission, which is not consistent with the current ecological concept. With mineral powder as the main raw material and sodium silicate as alkali activator to prepare a new type of low carbon geopolymer cementing material solidified silt as engineering filler, we carry out an experiment and analysis of the mechanical property and compressive property of geopolymer solidified soil. The results show that compared with the solidified soil with 10% cement content, the unconfined compressive strength of geopolymer solidified soil with 10% mineral powder content increases by 406.1% for 28 d, and the failure form of solidified soil changes from plastic failure to elastic failure. The stress-strain curve shows obvious stress peak, which could better meet the needs of common filling materials. It has good ecological benefit and broad application prospect. Thus it can provide an effective way for recycling dredged wastes.

Keywords: geopolymer; unconfined compressive strength; stabilized soil

我国是目前世界上航道疏浚总量最大的国家^[1]，长期以来废弃疏浚土大多抛弃到深槽水域，未能有效利用，少量的利用局限于吹填造陆，方式单一。简单粗放的处理方式不仅造成泥

土资源的浪费，还对生态环境造成二次污染。此外，传统水泥制造占全球碳排放的7%左右，为高耗能、高排放产品，与当今生态理念不符。新型地聚合物胶凝材料利用粉煤灰等工业废渣经过

收稿日期：2021-12-28

*基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFB2600200)

作者简介：王锌鑫(1998—)，男，硕士研究生，从事疏浚土固化研究。

碱激发形成, 具有凝结硬化快、早期强度高、耐久性优等特性^[2], 同时具有制备材料来源广泛、生产耗能低、污染小等优点。此外, 地聚合物能够有效利用工业废渣, 生产过程中污染和能耗低, 是一种节能、节土、利废的可持续发展材料, 符合绿色建材及固体废弃物建材资源化的理念。

目前, 地聚合物固化疏浚淤泥作为工程地基填料尚处于研究初期, 石小康^[3]以碱渣+矿渣作为地聚合物原料固化市政河道淤泥, 28 d 无侧限抗压强度可达 556 kPa; 杨俊钊等^[4]以偏高岭土与硅酸钾为地聚合物原料固化沿海淤泥, 固化土 28 d 无侧限抗压强度可达 1 000 kPa。除强度以外, 固化土的压缩特性如破坏应变、变形系数等也是重要参数, 对工程应用具有极其重要的作用。现阶段, 地聚合物固化土的压缩特性研究相对缺乏, 地聚合物固化疏浚淤泥大多以沿海疏浚淤泥以及市政河道淤泥为主, 对于长江航道疏浚淤泥的研究较少。

笔者针对长江中下游疏浚淤泥分别采用矿粉基地聚合物与水泥固化, 探究影响地聚合物固化土强度的因素, 分析地聚合物固化土的压缩特性, 对比地聚合物固化土与水泥固化土力学性能以及压缩特性, 为地聚合物固化疏浚淤泥的低碳、绿色工程应用提供借鉴。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用淤泥来自长江中下游疏浚淤泥, pH 值 7.67。试验前, 先将现场取来的疏浚淤泥烘箱 80 ℃ 烘 24 h, 烘干后粉碎过 1 mm 筛备用; 采用矿粉+水玻璃制备地聚合物, 矿粉选取等级为 S105, 主要成分为 SiO_2 与 Al_2O_3 , pH 值 6.33; 试验用水泥为普通硅酸盐 P042.5。疏浚淤泥、矿粉、水泥成分见表 1, 疏浚淤泥颗粒级配见图 1。试验所用碱激发剂为硅酸钠, 模数为 2.3, NaOH 为固体片状, 纯度为 99.8%。试验前用 NaOH 将硅酸钠调配至不同模数备用。

表 1 疏浚淤泥、矿粉、水泥化学成分含量

材料	Loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	SO_3
疏浚淤泥	-	55.4	19.1	7.5	8.0	3.9	3.3	0.8	1.1	0.1
矿粉	2.0	42.0	16.0	-	40.0	-	-	-	-	-
水泥	-	20.6	5.7	5.0	62.3	2.5	-	0.4	0.3	3.2

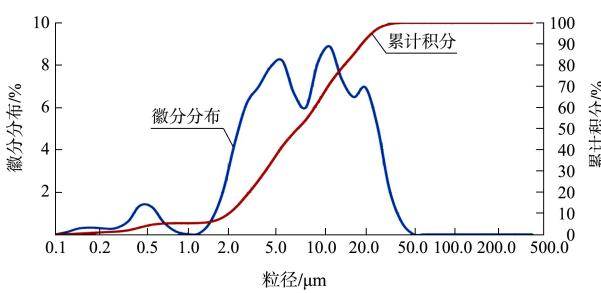


图 1 疏浚淤泥颗粒级配

1.2 试验方法与制作

根据已有研究, 综合考虑本试验固定水泥、矿粉掺量取 10%, 疏浚淤泥含水率 40%, 改变碱激发剂硅酸钠掺量分别为矿粉的 10%、20%、30%, 并调整硅酸钠溶液的模数分别为 0.7、1.0、1.5、2.0, 试验方案见表 2。

表 2 地聚合物固化土各成分掺量

水泥掺量/%	矿粉掺量/%	硅酸钠掺量/%	模数	淤泥含水率/%
10	-	0	0	40
-	10	10	0.7	40
-	10	10	1.0	40
-	10	10	1.5	40
-	10	10	2.0	40
-	10	20	0.7	40
-	10	20	1.0	40
-	10	20	1.5	40
-	10	20	2.0	40
-	10	30	0.7	40
-	10	30	1.0	40
-	10	30	1.5	40
-	10	30	2.0	40

先将已配好模数的硅酸钠与定量的矿粉充分搅拌混合，再加入定量的含水率为 40% 的疏浚淤泥，在水泥砂浆搅拌机中搅拌 2 min，铲掉搅拌机叶片上黏结的掺料，继续搅拌至混合物均匀。将搅拌土加入直径 50 mm、高 100 mm 的 PVC 模具中并填充至 1/3 高度，将模具放置在振动台振动 30 s 在振动过程中加入混合料，装满模具后，振动 2 min 至混合物均匀，从振动台取下模具并加盖保鲜膜。最后放入养护箱进行标准养护。当 PVC 模具内试样固化 7、14 和 28 d 时，对试样进行脱模。

1.3 试样检测

试样检测依据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》利用万能试验机进行无侧限抗压强度试验。以 1 mm/min 压缩速度为无侧限抗压强度，若试样进行加压，当试样发生脆性破坏即有明显破裂面时，以峰值轴向应力发生塑性破坏无应力峰值时，取轴向应变 15% 处的应力作为无侧限抗压强度。绘制固化土应力-应变曲线，确定无侧限抗压强度时需进行数据的前期处理，即以加载压力值除以横截面积的结果作为应力值，以压缩量除以试样初始长度的结果作为应变值，以确定试样在受压过程中应力和应变的实时变化情况(图 2)。



a) 试样浇筑



b) 无侧限抗压强度检测

图 2 试验浇筑与无侧限抗压强度检测

2 结果与分析

2.1 无侧限抗压强度

2.1.1 硅酸钠掺量的影响

地聚合物固化土 7、28 d 无侧限抗压强度与硅酸钠掺量关系见图 3。

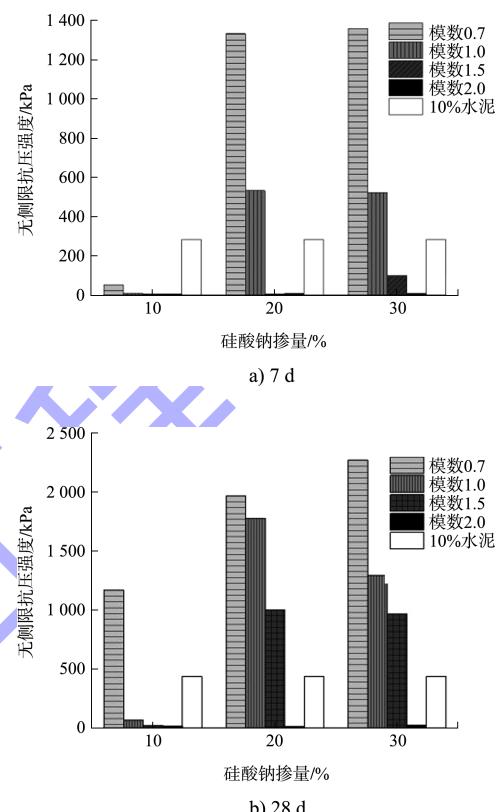


图 3 地聚合物固化土 7、28 d 无侧限抗压强度与硅酸钠掺量关系

由 3 图可知，随着硅酸钠掺量的增加，地聚合物固化土 7、28 d 无侧限抗压强度变化取决于硅酸钠溶液模数。当硅酸钠溶液模数为 0.7 时，随着硅酸钠掺量的增大，固化土强度逐渐增加，但强度增长放缓。当硅酸钠溶液模数为 1.0~1.5 时，随着硅酸钠掺量的增大，固化土强度呈现先增大再减小的趋势，Pelisser 等^[5]也发现类似结论。硅酸钠模数为 2 时，硅酸钠掺量增大到 30% 也无法有效激发矿粉实现固化。当硅酸钠模数过大，所需氢氧化钠量少，无法提供碱性环境，而且硅酸钠模数越大硅酸钠溶液中的高聚合度的硅氧四面体越多，不利于固体矿物聚合材料合成反应的进行^[6]。

2.1.2 硅酸钠模数的影响

由图 3 可知，地聚合物固化土 7、28 d 无侧限

抗压强度随着硅酸钠溶液模数从 0.7 增加到 2 逐渐降低, 直至远远小于水泥固化土强度。因为地聚合物缩聚反应的第一步为硅铝材料在强碱性环境下从材料中释放硅、铝单体, 硅酸钠溶液模数越低, 所需 NaOH 越多, 越可以提供更强的碱性环境以促进硅、铝单体的溶出, 促进缩聚反应生成的凝胶体增多, 有助于提高强度。此外, 硅酸钠溶液模数越低, 溶液中硅氧四面体的聚合度越低, 由架状结构向岛状结构转变, 使体系聚合速率与解构产物的定向迁移速率匹配, 产物获得高强。

2.1.3 无侧限抗压强度对比

进行同掺量、不同固化剂对固化土强度影响的研究, 试验结果见图 4。

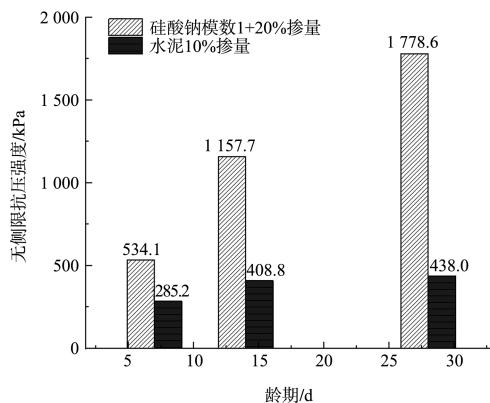


图 4 硅酸钠与水泥固化土-无侧限抗压强度对比

选取 10% 水泥掺量的固化土与矿粉掺量 10%、模数为 1、硅酸钠掺量 20% 的地聚合物固化土进行无侧限抗压强度对比。由图 4 可知, 7~28 d 各龄期下地聚合物固化土无侧限抗压强度都比水泥固化土高。水泥固化土无侧限抗压强度随龄期增加而增大, 但其强度增长速率随着龄期增加而急速衰减, 而地聚合物固化土强度增长速率远大于水泥固化土, 7~14 d、14~28 d 水泥固化土无侧限抗压强度分别提高 43.3% 和 7.1%; 地聚合物固化土无侧限抗压强度分别提高 116.8% 和 53.6%。此外, 地聚合物固化土 28 d 无侧限抗压强度高出水泥固化土 28 d 无侧限抗压强度 4 倍, 达 1.78 MPa。

2.2 固化土的压缩变形特性

2.2.1 固化土的应力-应变曲线

水泥、地聚合物固化土的应力-应变曲线如

图 5 所示。

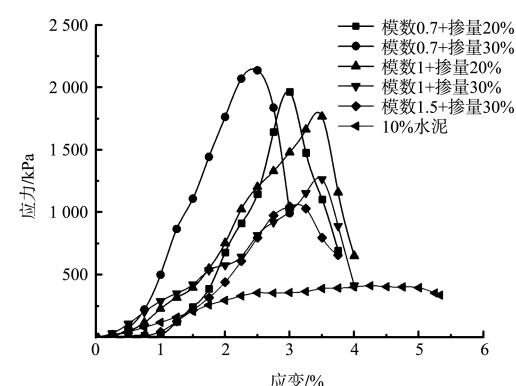
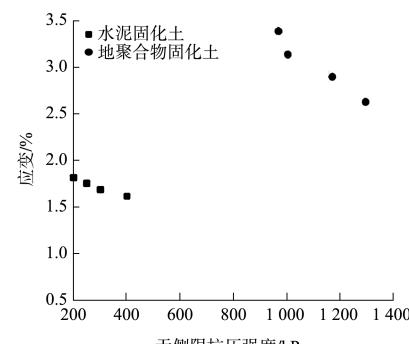


图 5 固化土应力-应变曲线

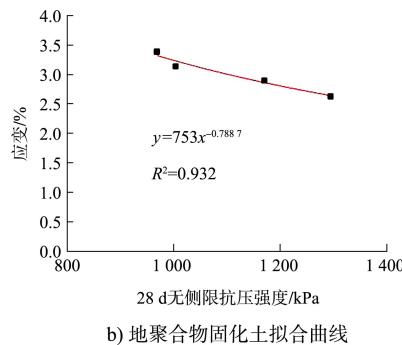
由图 5 可知: 地聚合物固化土破坏应变分布在 2.0%~3.5%, 且出现明显的应力峰, 主要因为矿粉被碱激发剂激发, 发生聚合反应生成大量凝胶体并固化, 提高了土骨架的承载力, 土体破坏形式由塑性破坏(无应力峰)转化为弹性破坏(明显应力峰), 且强度越大破坏应变越小, 表明土体塑性越弱; 地聚合物固化土应力-应变曲线在水泥固化土应力-应变曲线之上, 表明地聚合物固化土的强度远大于水泥固化土, 地聚合物固化土出现了明显的弹性应力峰破坏, 而水泥固化土全程没有明显应力峰, 为塑性破坏。可能原因是水泥固化土中水泥掺量不足, 没有足够的水化反应产物以形成土骨架支撑结构, 依然表现为黏土特性的塑性破坏。

2.2.2 固化土的破坏应变与抗压强度关系

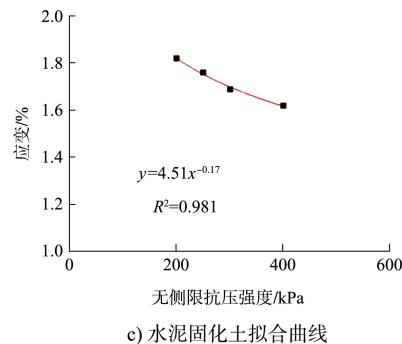
破坏应变 ε_f 是表明材料韧性与脆性的一个重要参数, ε_f 越大说明材料韧性越强, 反之材料则容易脆性破坏。许多工程如地基、堤防等都希望材料有较强的韧性。图 6 是水泥固化土与地聚合物固化土的破坏应变与抗压强度的散点图。



a) 水泥固化土与地聚合物固化土破坏应变与抗压强度关系



b) 地聚合物固化土拟合曲线



c) 水泥固化土拟合曲线

图 6 固化土破坏应变与抗压强度的关系

由图 6 可知, 破坏应变与抗压呈反比, 即抗压强度越大破坏应变越小, 材料越容易发生脆性破坏, 这与其他学者相关试验结果相同^[7]。地聚合物固化土散点全部分布在水泥固化土左上方, 说明地聚合物固化土比水泥固化土有更高的抗压强度、更大的破坏应变以及更好的韧性。

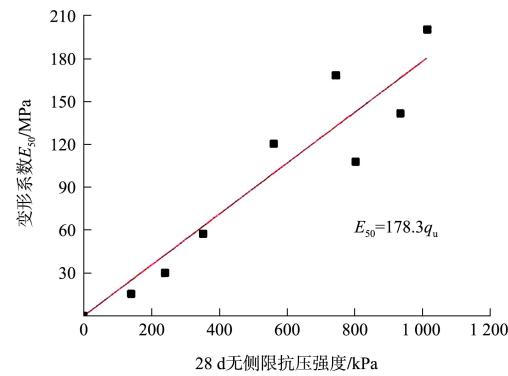
2.2.3 固化土的变形系数 E_{50} 与抗压强度关系

变形系数 E_{50} 也是固化土压缩特性的参数, 变形系数被定义为:

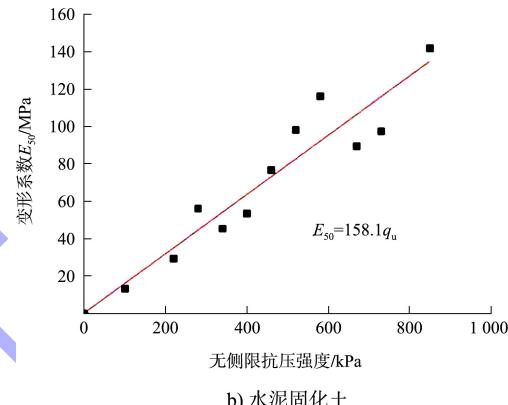
$$E_{50} = \frac{\sigma_{1/2}}{\varepsilon_t / 2} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{1/2}$ 是压缩应变为破坏应变一半时的压缩应力, 因此也可以把 E_{50} 视为此时的割线模量。朱伟等^[8]发现水泥固化海洋疏浚土变形系数与抗压强度关系为: $E_{50} = 167.32q_u$ 。固化土变形系数 E_{50} 与抗压强度的关系见图 7。

由图 7 可知, 变形系数 E_{50} 随着抗压强度的增加而近似线性增大, 与其他学者研究的水泥固化土变化规律相近。拟合直线表达式为 $E_{50} = 178.3q_u$, 其斜率 178.3 大于水泥固化土拟合曲线斜率 158.1, 说明地聚合物固化土变形系数随抗压强度增长而增大的速率大于水泥固化土。



a) 地聚合物固化土



b) 水泥固化土

图 7 固化土变形系数与抗压强度的关系

3 结论

1) 矿粉+硅酸钠固化疏浚淤泥时, 固化土强度变化取决于硅酸钠溶液模数, 硅酸钠模数低于 1 时固化土强度随硅酸钠掺量增加而增加, 当硅酸钠溶液模数在 1.0~1.5 时存在最佳掺量 20%, 硅酸钠溶液模数大于 2 时加大掺量也无法激发矿粉固化疏浚淤泥。

2) 较之 10% 水泥掺量的固化土, 同样 10% 矿粉掺量的地聚合物固化土 28 d 无侧限抗压强度提高 406.1%, 具有更大的破坏应变及更好的韧性。

3) 基于低碳地聚合物胶凝材料固化疏浚淤泥, 既能实现对疏浚淤泥资源再利用、减小对环境的影响, 又为工程提供成本低廉、性能优良的土工材料, 具有良好的生态效益和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 陈萌, 杨国录, 徐峰, 等. 淤泥固化处理研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 128-138.