

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.106



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



采用骨料架构-固化技术对开挖淤泥加固试验研究

邵吉成^{1,2}, 袁波³, 白银银², 骆嘉成⁴

(1. 浙江华坤地质发展有限公司, 浙江温州 325006; 2. 温州市地质资源与生态环境重点实验室, 浙江温州, 325006; 3. 浙江省第十一地质大队, 浙江温州 325006; 4. 温州市渣土利用开发股份有限公司, 浙江温州 325700)

摘要: 为了对淤泥和建筑垃圾进行处置, 实现二者的共同资源化利用, 在室内和现场分别对淤泥进行固化试验。将建筑垃圾作为骨料按淤泥质量比的 15% 添加到淤泥中, 再向淤泥中加入淤泥固化剂, 通过机械搅拌的方式将淤泥与建筑垃圾、固化剂混合均匀, 然后对固化土进行养护。室内试验结果表明, 当固化剂掺量为 8% 时, 固化淤泥土强度较高, 养护 28 d 后, 室内无侧限抗压强度可达 320 kPa; 在现场试验中, 静力触探试验和平板荷载试验表明, 固化剂对淤泥的固化效果明显。将低剂量固化剂添加到淤泥中, 固化淤泥土强度较低, 骨料的架构作用不明显; 当固化剂掺量为 8% 时, 固化土的强度较高, 骨料的架构作用有利于提升固化淤泥土的承载力, 土体的承载力特征值可达 325 kPa, 架构作用对固化淤泥土强度的提升率为 71.05%, 可实现淤泥和建筑垃圾的同步资源化利用。

关键词: 淤泥固化; 骨料; 资源化利用; 架构作用; 承载力

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)01-0100-10

Experimental study on stabilized excavated sludge based on structural support-solidification technique

SHAO Jicheng^{1,2}, YUAN Bo³, BAI Yinyin², LUO Jiacheng⁴

(1. Zhejiang Huakun Geological Development Co., Ltd., Wenzhou 325006, Zhejiang, P. R. China; 2. Wenzhou Key Laboratory of Geological Resources and Ecological Environment, Wenzhou 325006, Zhejiang, P. R. China; 3. The 11th Geology Team of Zhejiang Province, Wenzhou 325006, Zhejiang, P. R. China; 4. Wenzhou Construction Residue Utilization and Development Co., Ltd., Wenzhou 325700, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: To dispose of sludge and construction waste and facilitate their common resource utilization, the solidification tests of sludge are carried out in the laboratory and in site. In the field test, the construction waste is used as aggregate and added to the sludge by 15% of the mass ratio of the sludge, and then the sludge solidified agent is added to the sludge. Sludge, construction waste and solidified agent are mixed evenly by mechanical stirring, and finally the solidified soil is cured. The laboratory test results show that when the

收稿日期: 2022-07-07

基金项目: 温州市基础性科研项目(S2020024)

作者简介: 邵吉成(1992-), 男, 主要从事软基处理、环境岩土工程、固废资源化利用等领域的研究和应用, E-mail: shaojicheng2021@126.com。

骆嘉成(通信作者), 男, 教授级高工, E-mail: 252735683@qq.com。

Received: 2022-07-07

Foundation item: Basic Research Projects of Wenzhou (No. S2020024)

Author brief: SHAO Jicheng (1992-), main research interests: soft foundation treatment, environmental geotechnical engineering and solid waste resource utilization, E-mail: shaojicheng2021@126.com.

LUO Jiacheng (corresponding author), professor senior engineer, E-mail: 252735683@qq.com.

content of solidified agent is 8%, the strength of solidified sludge is quite high, and the laboratory UCS of solidified sludge can reach 320 kPa after curing for 28 days. The cone penetration test and plate loading test in field show that the solidified agent has an obvious solidifying effect on sludge. With low dose solidified agent, the structure effect of aggregate is not obvious. When the content of solidified agent is 8%, the structure effect of aggregate is beneficial in improving the bearing capacity of solidified sludge and the characteristic soil bearing capacity can reach 325 kPa. The improvement rate of solidified sludge by structure effect is 71.05%, which facilitates the common resource utilization of silt and construction waste.

Keywords: sludge solidification; aggregate; resource utilization; structural supported action; bearing capacity

浙江东南地区地下广泛分布着全新世中近期沉积淤泥层,淤泥层厚度最高可达 40 m,是中国著名的软土区^[1]。因工程建设的开展,温州市每年产生大量的地下开挖工程渣土,除浅部少量的杂填土、耕植土外,大部分开挖的工程渣土属于软弱淤泥。据统计,因工程建设的开展,2020 年温州市域产生的工程渣土超过 1 200 万 m³,其中淤泥产量约占工程渣土总量的 80%。温州地区地下开挖淤泥的含水率一般不低于 60%,且开挖淤泥的黏粒含量高,质地较软,在工程中难以被直接利用^[2-3],挖出的淤泥通常被运输到瓯飞消纳场进行填埋。当前温州市主要的消纳场已闭气饱和,市域周边仅有少量小型消纳场作为淤泥填埋用地,淤泥的处置问题一度成为温州市乃至浙江沿海城市工程建设面临的棘手问题。当前中国没有适合的处置技术对地下开挖淤泥进行资源化处置,也很少有能够大量消纳利用这些开挖淤泥的工程项目,因此,以填埋为主的淤泥处置模式在短期内不会改变^[4-5]。采用堆弃、填埋等方式对淤泥进行处置,不仅需要大面积的后场作为消纳场地,造成大量的土资源的浪费,也会对周围环境产生污染^[6-8]。固化技术是实现淤泥资源化利用的一个重要方向,相较于其他处置技术,淤泥的固化技术具有处理量大、速度快、效果优良等特点,近些年研究人员在国内外开展了相关研究工作^[3,9]。杨爱武等^[10]将生石灰用于对海相软土的固化,发现水化硅酸钙、针状钙矾石、无定形文石、Ca(OH)₂等生成物填充了软土的孔隙,使土体强度得到提升,固化淤泥土的强度在较大程度上依赖于土颗粒之间的胶结作用。Pongsivasathit 等^[11]采用水泥对黏土进行固化,为水泥固化淤泥土作为路基材料提供设计参数。Cai 等^[12-14]采用活性氧化镁对淤泥进行固化-碳化试验研究,通过微观表征技术分析

出活性氧化镁对黏土的固化机理,并提出活性延缓对黏土的碳化反应微观模型。还有学者将钢渣^[15-16]、矿渣^[17]、粉煤灰^[18-19]等工业副产品与相应的激发材料进行混合,再对软土进行固化处理,不仅可以实现对淤泥的固化,而且对工业副产品进行资源化利用,达到“以废治废”的目的。基于“以废治废”的理念,可考虑将建筑拆除垃圾与地下开挖淤泥同时进行处置,实现两种废弃物的同步资源化利用。随着城市建设的不断开展,每年会产生大量的建筑拆除垃圾,除了少量的金属、建材家具经过分选利用以外,大量的建筑拆除垃圾通常直接堆放、填埋或经简单处理后作为路基填料,利用率较低。统计表明,中国建筑固废的平均资源化利用率不足 10%,而发达国家建筑固废的平均资源化利用率可达 90% 以上,对于建筑拆除垃圾的资源化利用同样是一项亟待解决的问题^[20-21]。

淤泥固化是实现其资源化利用的重要方向之一,但并未发现有将建筑垃圾和淤泥共同处置的报道。笔者选取温州地下室开挖淤泥作为研究对象,在室内对淤泥进行固化试验研究,探究固化剂对温州淤泥的固化效果;在现场对淤泥进行原位固化试验,将淤泥和建筑拆除垃圾共同固化处置,并通过平板荷载试验检测固化淤泥土的承载力,探究建筑拆除垃圾对固化淤泥土承载力的提升效果。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

取温州市地下开挖淤泥为试验对象,参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[22]检测淤泥的各项基本指标,结果如表 1 所示,淤泥含水率超过 60%,是温州地区具有代表性的地下开挖淤泥。淤泥固化剂原材料为多种工业废弃物,辅以添加少量

表 1 淤泥的物理性质

Table 1 Physical properties of sludge

含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	有机质含量 $P_C/\%$	孔隙比 e	干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$	压缩模量 E_s/MPa
66.3	52.5	27.5	3.4	1.821	0.86	2.03

激发剂,以激活材料活性,采用 X 射线荧光光谱仪测得固化剂主要化学成分,详见表 2。建筑拆除垃圾取自温州市某建材垃圾场,主要成分为废弃混凝土、碎砖块及少量砂浆碎块,性质见表 3,粒径大部分在 2~10 cm 之间,颗分曲线见图 1。

表 2 固化剂的化学成分

Table 2 Chemical composition of the solidified agent

%							
CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	SO ₃	烧失量
68.21	2.07	17.22	3.42	3.13	0.08	1.44	1.25

表 3 建筑拆除垃圾各项指标

Table 3 Indicators of construction waste

粒径/ cm	强度/ MPa	空隙 率/%	堆积密度/ (kg/m ³)	含水 率/%
2~10	≥5	46.6	1 480	0.77

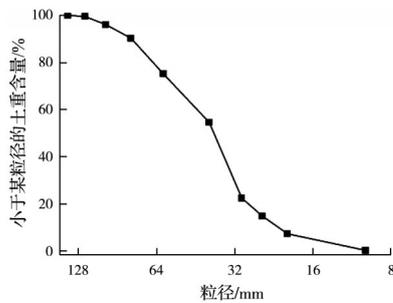


图 1 建筑垃圾的颗分曲线

Fig. 1 Gradation curve of construction waste

1.2 室内试验方案

淤泥的室内固化试验配比方案如表 4 所示。固化淤泥土的制样及养护试验参照相关标准^[23-24]执行,将称量好的固化剂倒入淤泥中并混合均匀,采用模具制作无侧限抗压强度试样,试样规格为 $\Phi=39.1$ mm, $h=80$ mm,试样脱模后用保鲜膜包裹,在 $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 95% 的条件下进行养护。待试样养护至相应龄期后,检测固化淤泥的各项物性指标,包括土样的含水率、压缩模量、压缩系数、孔隙比、密度以及土样的无侧限抗压强度等指标,探究固化剂掺量对淤泥物性指标的影响,每组试验制备 3 个平行样,取平均值作为代表结果。固结试验的设计荷载分别为 12.5、25、50、100、200、400、800 kPa,仪器选用 WG 型单杠固结仪;无侧限抗压试验加载速度为 1.2 mm/min,仪器选用 YYW-Ⅱ 型无侧限抗压强度仪,其他试验方法参照标准^[22]执行。

1.3 现场试验方案

以室内试验结果为参考,在现场将合适比例的固化剂与淤泥混合,并进行现场原位固化试验。在进行现场试验时,除了向淤泥中添加固化剂外,还将建筑拆除垃圾作为骨料添加到淤泥中,骨料比例

表 4 室内试验固化剂掺量

Table 4 Mixing ratio of solidified sludge of laboratory test

固化剂掺量/%	淤泥/g	固化剂/g
0.5	995	5
1	990	10
2	980	20
4	960	40
8	920	80
12	880	120
16	840	160

按与淤泥质量比的 15% 添加。将试验区划分出 8 块单元区,试验单元的长×宽×高为 3.5 m×3 m×1.2 m,其内部回填淤泥(淤泥来源同室内试验)。将一定比例的固化剂和建筑垃圾平铺于淤泥表面,采用 ALLU 搅拌设备将材料与淤泥混合均匀,并自然养护(温度为 24~35 °C,湿度为 57%~74%)。在固化淤泥土养护 28 d 时对未加骨料的固化区域土体进行静力触探试验,并采用平板荷载试验检测各单元固化淤泥土的承载力。图 2 为各单元区固化剂添加比例。

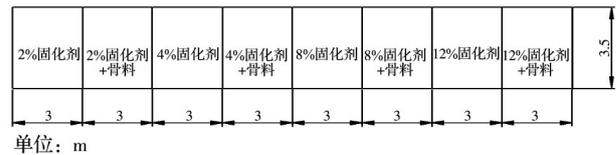


图 2 现场试验平面布置图

Fig. 2 The layout of site test

2 室内试验结果及分析

2.1 含水率的变化

试验采用的固化剂为干燥粉剂,与淤泥混合后,其自身重量对淤泥的含水率有一定的稀释作用。根据固化剂掺入比,计算每组试验中固化剂掺入后土体的理论含水率值,并测试各养护龄期下土体的实际含水率,结果如图 3 所示。淤泥的原始含水率为 66.3%,增加固化剂掺量,各龄期下固化淤泥土的含水率均呈明显下降趋势,且与理论含水率的差距也逐渐增加。表 5 为各试验组固化淤泥含水率实际降低值与理论计算值的差值统计表,其差值表示固化作用对淤泥中的水分转化量。

养护的前期主要发生水化反应,在养护 1 d 后,固化淤泥土含水率的实际降低值与理论计算值即出现较大的差距,表明固化剂的水化反应对淤泥中的水有较大的消耗作用,水化反应的生成物包括 CSH、CAH 和 CASH 等胶结物^[8, 15];随着养护时间的增加,固化剂水化产物中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会继续与淤泥中的矿物成分发生火山灰反应,进一步消耗淤泥土体中的水分,导致土体含水率持续下降^[11, 13, 25]。当

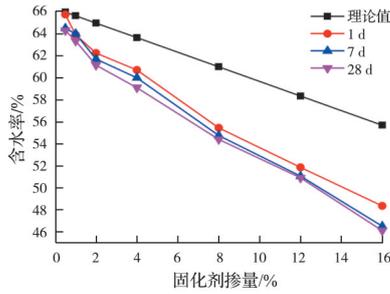


图 3 土样的含水率随固化剂掺量的变化

Fig. 3 Changes of water content of samples with percent of solidified agent

表 5 含水率降低值与理论计算值之差

Table 5 Difference between the decrease value of moisture content and the theoretical calculation value

龄期/ d	含水率降低值与理论计算值之差/%						
	掺量 0.5%	掺量 1%	掺量 2%	掺量 4%	掺量 8%	掺量 12%	掺量 16%
1	0.22	1.74	2.72	2.95	5.55	6.49	7.34
7	1.47	1.64	3.27	3.65	6.25	7.29	9.19
28	1.67	2.29	3.82	4.55	6.6	7.44	9.59

固化剂掺量为 8% 时,固化淤泥土在养护 1、7、28 d 后,土体含水率降低值与理论计算值之差分别为 5.55%、6.25%、6.6%,表明随着养护龄期的增加,火山灰反应对淤泥中水分的消耗速度下降^[26],且火山灰反应在养护的前 7 d 比较剧烈,后期仍有发生,但幅度较小。固化淤泥含水率的降低值反映出土体内部水化反应和火山灰反应的剧烈程度,同时从一定程度上反映出其胶结物的生成量,对固化淤泥的强度有积极作用^[27]。

2.2 压缩性的变化

固化淤泥土的压缩系数和压缩模量变化规律如图 4 所示。对于高含水率淤泥,当固化剂掺量低于 2% 时,固化淤泥土的压缩系数和压缩模量变化不明显;当固化剂掺量超过 2% 后,随着固化剂掺量的增加,土体的压缩模量出现较为明显的增加趋势,压缩系数出现相应的降低趋势,尤其是固化剂掺量从 4% 增加到 8% 时,土体的压缩模量增加幅度较为明显。此外,随着养护龄期的增加,固化淤泥土的压缩模量也呈现明显的增大趋势,当固化剂掺量达到 8% 时,土体养护 1 d 后的压缩模量为 15.105 MPa,为中压缩性土;当土体分别养护 7、28 d 后,其压缩模量分别为 19.621、23.745 MPa,为低压缩性土。

固化剂水化反应生成的凝胶体对高孔隙率淤泥有很好的充填作用,并胶结、包裹淤泥表面,使土体结构趋于紧实,并形成较为整体的结合体^[28-29],尤其是 CSH 凝胶的产生,对土体有很好的胶结效果^[27-28, 30],从而导致固化淤泥土的压缩性呈现降低趋势。此外,水化反应生成的高浓度的 Ca^{2+} 与淤泥

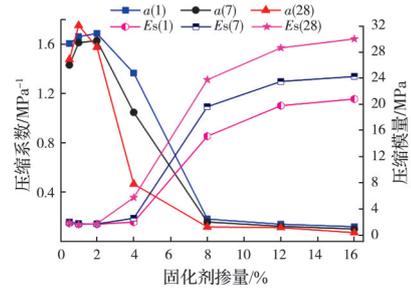


图 4 压缩系数和压缩模量随固化剂掺量的变化

Fig. 4 Compression coefficient and compression modulus with the percent of solidified agent

中 K^+ 、 Na^+ 发生离子交换作用,使土粒的结合水膜减薄并凝聚成团,改善了淤泥的力学性质^[25-27, 29]。

2.3 孔隙比和密度的变化

固化淤泥土的孔隙比和密度如图 5 所示。淤泥的初始孔隙比为 1.82,随着固化剂掺量的增加,土体的孔隙比呈现明显的下降趋势,当固化剂掺量为 8% 时,养护 28 d 后,土体的孔隙比下降为 1.5,降低率为 17.58%。固化剂与淤泥混合后,颗粒充填在淤泥孔隙之间,并与孔隙水发生水化反应,凝胶体在淤泥表面、孔隙中生成并持续发展,使固化淤泥土体更加密实;此外,离子交换作用使土颗粒之间的间距缩小,土体趋于密实^[26, 30-32]。相应地,当固化淤泥土趋于密实后,土体的密度呈现增大趋势,当固化剂掺量为 8% 时,在养护 28 d 后,土体的密度为 1.66 g/cm³,大于淤泥的初始密度 1.58 g/cm³。固化剂的堆积密度为 1 400 kg/m³,小于淤泥的密度,因此固化淤泥土体密度的增加不是由固化剂比重引起的,而是由淤泥土的孔隙率降低引起的。

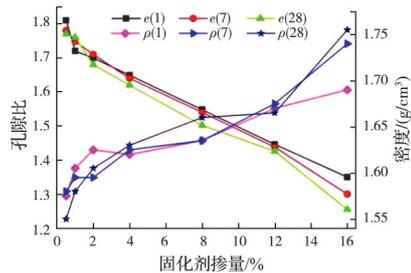


图 5 土样的孔隙比和密度随固化剂掺量的变化

Fig. 5 Changes of pore ratio and density of samples with the percent of solidified agent

2.4 强度的变化

固化淤泥土的各项物性指标的变化,最终在宏观上体现为土体强度的变化。如图 6 所示,当固化剂掺量不高于 4% 时,固化淤泥土强度较低。当固化剂掺量增加到 8%,养护 28 d 后,土体的无侧限抗压强度迅速提高至 320 kPa。随着固化剂掺量的增加,各养护龄期下土体的无侧限抗压强度都呈现明显的增加趋势,当固化剂掺量增加到 16% 时,固化

淤泥土的无侧限抗压强度为 355 kPa, 增长幅度趋于平缓。增加养护龄期, 固化淤泥土体的强度也呈现增长趋势^[32], 与前期关于固化淤泥土含水率的降低趋势相对应。

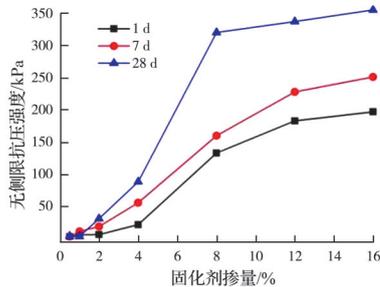


图 6 土样的无侧限抗压强度

Fig. 6 UCS of samples

在淤泥中加入固化剂后, 对淤泥强度的提高主要体现在物理改性和化学胶结两部分。物理改性由两部分组成: 1) 固化剂对淤泥含水率的降低效果。含水率降低使淤泥在受力时孔隙水压力降低, 土颗粒之间的有效应力增加, 使土颗粒之间更难出现滚动和滑移现象^[33-34], 这也是淤泥失水后强度增加的原因之一。2) 离子交换作用。固化剂的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 向淤泥中提供大量的 Ca^{2+} , 与淤泥中的 Na^+ 、 K^+ 发生离子交换作用, 导致淤泥的结合水膜变薄, 土颗粒凝聚成团, 土体的强度增加^[25-27, 29]。

固化剂对淤泥的化学胶结主要体现在两个方面: 1) 固化剂水化反应生成 CSH、CAH 和 CASH 等凝胶产物, 对淤泥有填充、胶结作用, 使土体结构更加密实, 且增加淤泥内部结构的稳定性, 是土体强度增加的主要原因^[2, 25-27, 29-30, 35]; 2) 在固化淤泥土养护期间, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与淤泥中的矿物成分发生火山灰反应, 其胶结物的生成是固化淤泥土强度随养护时间增加的重要因素之一^[3, 11, 13, 25-27, 29, 32, 35]。

3 现场固化试验结果及分析

建筑拆除垃圾主要为破碎的砖块、混凝土块、砂浆块, 其强度较高, 大部分直径在 2~10 cm, 是城市主要的固体废弃物之一, 通常将其用作路基回填料。在对淤泥的现场固化试验中, 将建筑拆除垃圾作为骨料添加到淤泥中, 如图 7 所示, 块状骨料和淤泥一并被固化, 骨料在固化淤泥土中形成高强度骨架, 在固化淤泥土中形成架构作用。现场固化试验的搅拌过程如图 8 所示。

3.1 静力触探试验结果

固化淤泥土中添加拆除建筑垃圾后, 其内部散乱地分布着高强度的骨料, 若对其进行静力触探试验, 土体强度显示出很大的随机性和偶然性, 结果



图 7 淤泥中添加骨料和固化剂

Fig. 7 Adding aggregate and solidified agent to the sludge



图 8 现场固化试验

Fig. 8 Solidified test in site

并不客观, 因此, 静力触探试验仅对未添加骨料的试验区域进行。单桥静力触探仪采购自武汉岩海工程科技有限公司, 仪器型号为 CLD-3 型, 仪器的锥头面积为 10 cm^2 , 试验方法参考规范^[36], 结果如图 9 所示。当固化剂超过 4% 时, 土体沿深度范围内的比贯入阻力值呈现一定的浮动, 表明淤泥与固化剂的混合存在一定的不均匀性, 但整体上表明固化剂对淤泥加固的效果较好。

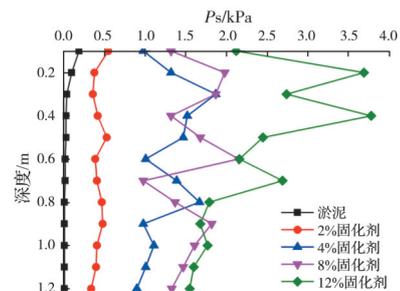


图 9 固化淤泥第 28 天静力触探试曲线

Fig. 9 Cone penetration test curve of solidified sludge on day 28

对各试验区域土体的比贯入阻力平均值进行汇总, 结果如表 6 所示。未处理的淤泥强度较低, 比贯入阻力平均值为 0.04 MPa, 浅部淤泥的比贯入阻力略大, 这是由浅层淤泥水分蒸发导致的。当固化剂掺量为 2% 时, 土体的比贯入阻力平均值为 0.428 MPa, 较原状淤泥有明显的提高作用。随着固化剂掺量的增加, 土体的比贯入阻力平均值也呈现明显的增大趋势, 当固化剂掺量为 8% 时, 土体的比贯入阻力平均值为 1.713 MPa, 根据静力触探试验结果估算地基承载力特征值为 146 kPa, 其他固化

区域土体承载力预估值详见表 6。

3.2 平板荷载试验结果

平板荷载试验参照规范执行^[22, 36],现场的平板荷载试验规格为 0.5 m×0.5 m,根据土体的沉降量确定其承载力特征值和极限荷载,土体的承载力特征值按沉降量为板宽的 1%(5 mm)对应的加载取值,极限荷载按沉降量为板宽的 6%(30 mm)对应的加载取值,各试验区土体平板荷载试验结果如图 10 所示。

将土体承载力特征值进行汇总,如图 11 所示。当固化剂掺量为 2% 时,添加骨料和未添加骨料情况下,固化淤泥土体承载力特征值分别为 44、47 kPa,表明骨料对固化淤泥并未起到架构作用,反而使固化淤泥土体的承载力降低了 6.4%。将固化剂掺量增加至 4% 后,添加骨料和未添加骨料的固化

表 6 固化淤泥比贯入阻力汇总表(28 d)

Table 6 Summary of the specific penetration resistance values of solidified sludge (28 days)

试验区	阻力值范围/ MPa	阻力平均值/ MPa	承载力特征 值/kPa
原状淤泥	0.01~0.19	0.04	
2% 固化剂	0.36~0.55	0.428	54.24
4% 固化剂	0.90~1.87	1.269	121.52
8% 固化剂	1.37~2.15	1.713	146.00

淤泥土的承载力特征值均为 150 kPa,骨料的架构作用对固化淤泥土的承载力特征值提升作用为 0%。试验结果表明,低剂量(≤4%)固化剂掺入时,由于固化淤泥土体强度较低,骨料的架构作用并不明显。

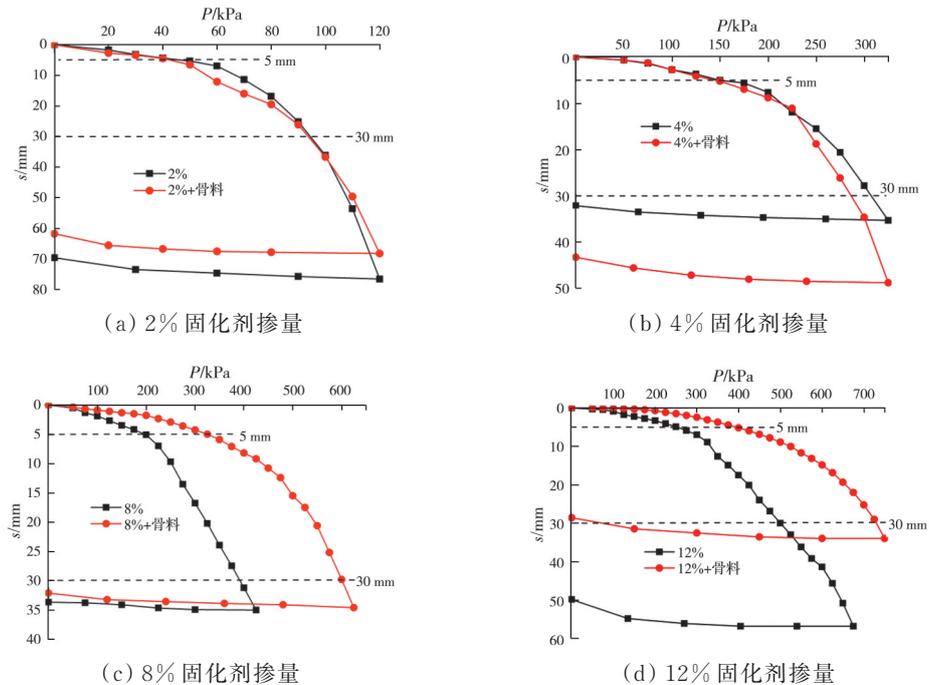


图 10 固化淤泥土平板荷载试验结果

Fig. 10 Plate loading test results of solidified sludge

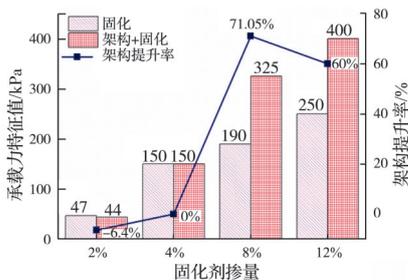


图 11 固化淤泥土承载力特征值

Fig. 11 Characteristic value of bearing capacity of sludge

当固化剂掺量为 8% 时,固化淤泥土体的承载力特征值为 190 kPa,明显低于同等固化剂掺量下,

添加骨料的土体承载力特征值(325 kPa),骨料的架构作用对固化淤泥土体的承载力特征值提升率为 71.05%。进一步将固化剂掺量提升至 12%,添加骨料和未添加骨料的固化淤泥土的承载力特征值分别为 400、250 kPa,骨料的架构作用对固化淤泥土体的承载力特征值提升率为 60%。各试验区土体极限荷载如图 12 所示,当固化剂掺量不低于 8% 时,骨料的架构作用比较明显。

不同于室内试验,在现场对淤泥进行固化搅拌时,通过 ALLU 机械搅拌的方式将淤泥与掺入材料进行规模化混合时,淤泥与材料并不能达到理想的

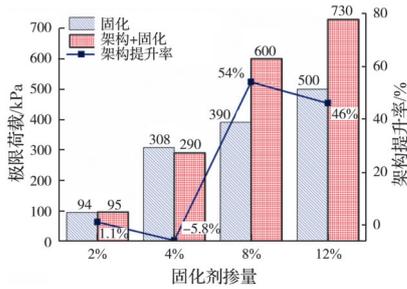


图 12 固化淤泥土的极限荷载

Fig. 12 Ultimate load of solidified sludge

完全混合效果,土体内部存在未与固化剂接触的软弱淤泥团体,其强度较接触固化剂的固化淤泥团体低。对固化区域土体进行开挖,如图 13 所示,开挖土体中仍有部分软弱淤泥土,在土体中属于薄弱区域。图 14 为固化后的淤泥,其形状不规则,强度较高,是固化剂与淤泥接触、混合以及反应后的结果。图 15 为固化淤泥土开挖沟槽的截面图,骨料零散、均匀地分布于固化淤泥土中,与土体形成整体。



图 13 固化淤泥土中的软弱部分

Fig. 13 Soft portion in solidified sludge



图 14 固化淤泥土中的硬化部分

Fig. 14 Hard portion in solidified sludge

参考骨料在混凝土中的作用,骨料的种类、颗粒形态、表面性能以及骨料的级配均是影响混凝土强度的重要因素^[37-39],粗骨料的架构作用是提高混凝土强度的重要原因之一^[40],混凝土强度高度依赖于粗骨料本身强度^[41]。在淤泥固化试验中,对于未添加骨料的试验区域,淤泥的固化示意图如图 16 所示,土体为固化淤泥团体与未固化淤泥团体的混合



图 15 骨料分散在固化淤泥土中

Fig. 15 The aggregate portion of solidified sludge

体,在外力作用下,未被固化的淤泥为薄弱区域。

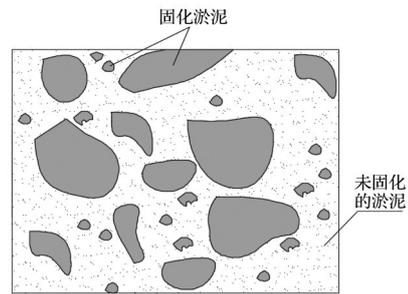


图 16 未添加骨料的淤泥固化示意图

Fig. 16 Schematic diagram of solidified sludge without aggregate

当向土体中添加骨料时,土体中包含骨料、固化淤泥团体和未固化淤泥团体,如图 17 所示。骨料的强度大,当固化剂掺量较高时,骨料与固化淤泥团体整体接触面积较大,高强度的骨料在土体中散乱分布并形成架构,与固化淤泥团体共同构成受力结构,可有效提高土体的承载力。当固化剂掺量较低时,固化淤泥团体的强度较低,土体中的薄弱区域较多,骨料的架构作用无法发挥,其承载力基本等同于甚至低于未添加骨料的固化淤泥土。因此,在试验中,固化剂掺量不超过 4% 时,骨料未显示出架构作用;固化剂掺量不低于 8% 时,骨料的架构作用明显。

根据平板荷载试验结果计算各固化区域土体的压缩模量,结果如图 18 所示。当未添加骨料,固化剂掺量分别为 2%、4%、8%、12% 时,土体的压缩

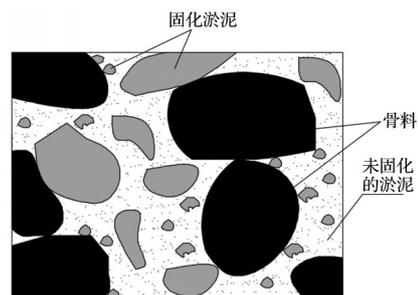


图 17 添加骨料的淤泥固化示意图

Fig. 17 Schematic diagram of solidified sludge with aggregate

模量分别为 4.12、10.9、15.2、22.97 MPa, 固化淤泥土的压缩模量随固化剂掺量的增加呈现出明显的增长趋势。向淤泥中添加骨料, 固化淤泥土体的压缩模量也呈现明显的增长趋势, 当固化剂掺量较低 ($\leq 4\%$) 时, 添加骨料后, 土体的压缩模量并未出现较大的变化; 当固化剂掺量为 8% 和 12% 时, 添加骨料后固化淤泥土体的压缩模量分别为 23.76、38.13 MPa, 相较于未添加骨料的固化淤泥土, 骨架的提升率分别为 55.2% 和 66%。

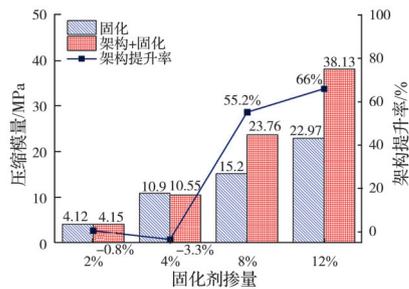


图 18 固化淤泥土体的压缩模量

Fig. 18 Compression modulus of solidified sludge

4 结论

1) 室内固化试验表明, 随着固化剂掺量的增加, 固化淤泥土体物性指标出现明显变化, 具体表现为含水率下降、压缩性降低、孔隙比减小。

2) 在淤泥中加入固化剂后, 对淤泥强度的提高主要体现在物理改性和化学胶结两部分。当固化剂掺量为 8% 时, 固化淤泥土强度较高, 其养护 28 d 后无侧限抗压强度可达 320 kPa。

3) 现场原位固化试验显示, 当固化剂掺量为 8% 时, 淤泥的固化效果较为明显, 根据静力触探试验检测土体的比贯入阻力平均值为 1.713 MPa, 估算地基承载力特征值为 146 kPa。

4) 向土体中添加骨料, 固化淤泥土体为骨料、固化淤泥团体和未固化淤泥团体混合物, 当固化剂掺量较高时, 骨料与固化淤泥团体共同构成受力结构, 可有效提高土体的承载力特征值。

5) 当固化剂掺量较高 ($\geq 8\%$) 时, 在淤泥中加入建筑垃圾后, 骨料的架构作用使固化淤泥土的地基承载力增加, 并降低固化淤泥土的压缩性, 可实现对淤泥和建筑垃圾的同步资源化利用。

参考文献

[1] 朱智勇, 曹玉苹. 温州地区淤泥的工程地质特性[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(4): 24-25.
ZHU Z Y, CAO Y P. Engineering geological characteristics of sludges in Wenzhou [J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 18(4): 24-25. (in Chinese)

[2] 谈云志, 柯睿, 陈君廉, 等. 偏高岭土增强石灰-水泥固化淤泥的耐久性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1146-1152.
TAN Y Z, KE R, CHEN J L, et al. Enhancing durability of lime-cement solidified sludge with metakaolin [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1146-1152. (in Chinese)

[3] 董辉, 程子华, 刘禹岐, 等. 生物酶改良淤泥质土的时效强度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 84-94.
DONG H, CHENG Z H, LIU Y Q, et al. Experimental study of aging strength of the mucky soils improved with bio-enzyme [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 84-94. (in Chinese)

[4] 王臻华, 项伟, 吴雪婷, 等. 碱性氧化剂对水泥固化淤泥强度的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 693-699.
WANG Z H, XIANG W, WU X T, et al. Influences of alkaline oxidant on strength of cement-stabilized sludge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 693-699. (in Chinese)

[5] 张春雷, 管非凡, 李磊, 等. 中国疏浚淤泥的处理处置及资源化利用进展[J]. 环境工程, 2014, 32(12): 95-99.
ZHANG C L, GUAN F F, LI L, et al. The progress in the reutilization treatment and disposal of dredged sediments in China [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(12): 95-99. (in Chinese)

[6] MESSINA F, FERONE C, MOLINO A, et al. Synergistic recycling of calcined clayey sediments and water potabilization sludge as geopolymer precursors: Upscaling from binders to precast paving cement-free bricks [J]. Construction and Building Materials, 2017, 133: 14-26.

[7] PENG X, ZHOU Y, JIA R, et al. Preparation of non-sintered lightweight aggregates from dredged sediments and modification of their properties [J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 9-20.

[8] YU TEPLYKH S, GRIDNEVA M A, DREMINA E V. Sludge pits of biological treatment plants and their reclamation [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1010(1): 012131.

[9] 袁波, 邵吉成, 骆嘉成, 等. 基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 66-74.
YUAN B, SHAO J C, LUO J C, et al. An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 66-74. (in Chinese)

[10] 杨爱武, 王韬, 许再良. 石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 996-1004.
YANG A W, WANG T, XU Z L. Experimental study on lime and its additional agent to cure Tianjin marine soft soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 996-1004. (in Chinese)

- [11] PONGSIVASATHIT S, HORPIBULSUK S, PIYAPHIPAT S. Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2019, 11: e00301.
- [12] CAI G H, LIU S Y, DU G Y, et al. Mechanical performances and microstructural characteristics of reactive MgO-carbonated silt subjected to freezing-thawing cycles [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(4): 875-884.
- [13] 刘松玉, 郑旭, 蔡光华, 等. 活性 MgO 碳化固化土的抗硫酸盐侵蚀性研究 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(11): 3057-3064.
LIU S Y, ZHENG X, CAI G H, et al. Study of resistance to sulfate attack of carbonated reactive MgO-stabilized soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(11): 3057-3064. (in Chinese)
- [14] CAI G H, LIU S Y, DU Y J, et al. Strength and deformation characteristics of carbonated reactive magnesia treated silt soil [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(5): 1859-1868.
- [15] SALIMI M, ILKHANI M, VAKILI A H. Stabilization treatment of Na-montmorillonite with binary mixtures of lime and steelmaking slag [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 14(3): 295-301.
- [16] WU Y K, ZHU J Y, SHI K J, et al. Study on the erosion mechanism of the solidified silt under sulphate-chloride erosion [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2022, 40(7): 3749-3762.
- [17] CHEN Z Z, YOU N Q, CHEN C, et al. Properties of dredged sludge solidified with alkali-activated slag-based materials and blended with copper slag as fine aggregates of mortars [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 312: 125459.
- [18] 吴俊, 征西遥, 杨爱武, 等. 矿渣-粉煤灰地质聚合物固化淤泥质黏土的抗压强度试验研究 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 647-655.
WU J, ZHENG X Y, YANG A W, et al. Experimental study on the compressive strength of muddy clay solidified by the one-part slag-fly ash based geopolymer [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3): 647-655. (in Chinese)
- [19] SUMESH M, SINGH B, VIGNESHWARAN K, et al. Effect of coal ash on strength characteristics of clayey silt soil treated with cement [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [20] HUANG B J, WANG X Y, KUA H, et al. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 36-44.
- [21] 肖源杰, 孔坤锋, 姜钰, 等. 建筑固废再生粒料基层填料动回弹模量特性及统一预估模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(11): 2337-2352.
XIAO Y J, KONG K F, JIANG Y, et al. Investigating resilient modulus characteristics and developing unified prediction model of unbound aggregate base materials recycled from construction and demolition waste [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(11): 2337-2352. (in Chinese)
- [22] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [23] 水泥土配合比涉及规程: JGJ/T 233—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Specification for mix proportion design of cement soil: JGJ/T 233—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [24] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG E51—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese)
- [25] 章荣军, 郑俊杰, 程钰诗, 等. 养护温度对水泥固化淤泥强度影响试验研究 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(12): 3463-3471.
ZHANG R J, ZHENG J J, CHENG Y S, et al. Experimental investigation on effect of curing temperature on strength development of cement stabilized clay [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(12): 3463-3471. (in Chinese)
- [26] 邵吉成, 袁波, 骆嘉成, 等. 固化剂加固温州淤泥的物理力学性质研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(3): 935-944.
SHAO J C, YUAN B, LUO J C, et al. Research on the physical and mechanical properties of Wenzhou silt reinforced by solidified agent [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(3): 935-944. (in Chinese)
- [27] 甘雅雄, 朱伟, 吕一彦, 等. 从水分转化研究早强型材料固化淤泥的早强机理 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(4): 755-760.
GAN Y X, ZHU W, LÜ Y Y, et al. Early-strength mechanism of cementitious additives from perspective of water conversion [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 755-760. (in Chinese)
- [28] 黄英豪, 朱伟, 董婵, 等. 固化淤泥结构性力学特性的试验研究 [J]. *水利学报*, 2014, 45(Sup2): 130-136.
HUANG Y H, ZHU W, DONG C, et al. Experimental study on structural behaviour of solidified dredged material [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(Sup2): 130-136. (in Chinese)
- [29] ZHAO H G, LIU C, HUANG G, et al. Experimental

- investigation on rockburst process and failure characteristics in trapezoidal tunnel under different lateral stresses [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 259: 119530.
- [30] 杨志强, 郭见扬. 石灰处理土的物理力学性质及其微观机理的研究[J]. *岩土力学*, 1991, 12(3): 11-23.
YANG Z Q, GUO J Y. The physio-mechanical properties and micro-mechanism in lime-soil system [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1991, 12(3): 11-23. (in Chinese)
- [31] 陈瑞敏, 简文彬, 张小芳, 等. CSFG-FR协同作用改良淤泥固化土性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(4): 1020-1030.
CHEN R M, JIAN W B, ZHANG X F, et al. Experimental study on performance of sludge stabilized by CS-FG-FR synergy [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(4): 1020-1030. (in Chinese)
- [32] 骆嘉成, 邵吉成, 袁波, 等. 分层加固法对温州淤泥类渣土加固的现场试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(Sup2): 3483-3492.
LUO J C, SHAO J C, YUAN B, et al. Study of field test on reinforcement of Wenzhou sludge by layered reinforcement method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(Sup2): 3483-3492. (in Chinese)
- [33] 陈海明, 班凤其, 刘小伟. 非饱和土抗剪强度指标 c 、 Φ 值与含水量 ω 的关系[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2006, 29(6): 736-738, 746.
CHEN H M, BAN F Q, LIU X W. Relationship between water content ω and unsaturated soil shear strength indices c and Φ [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2006, 29(6): 736-738, 746. (in Chinese)
- [34] 陈鸿宾, 陈学军, 齐运来, 等. 干密度与含水率对重塑红黏土抗剪强度参数影响研究[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(5): 1035-1040.
CHEN H B, CHEN X J, QI Y L, et al. Effects of dry density and moisture content on shear strength parameters of remolded red clay soil [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(5): 1035-1040. (in Chinese)
- [35] 王旭影, 乔京生, 赵建业, 等. 电石渣激发钢渣-矿渣固化淤泥质土的试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(2): 733-739.
WANG X Y, QIAO J S, ZHAO J Y, et al. Solidification of muddy soil with steel slag and ground granulated blast-furnace slag activated by calcium carbide slag [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(2): 733-739. (in Chinese)
- [36] 建筑地基检测技术规范: JGJ 340—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Technical code for testing of building foundation soils: JGJ 340—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [37] LARRARD F D, BELLOC A. The influence of aggregate on the compressive strength of normal and high-strength concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 1997, 94(5): 417-426.
- [38] 胡子磊, 刘晓庆, 周昌, 等. 粗骨料中软弱颗粒含量对混凝土强度的影响[J]. *云南水力发电*, 2021, 37(6): 6-8.
HU Z L, LIU X Q, ZHOU C, et al. Effect of soft particle content in coarse aggregate on concrete strength [J]. *Yunnan Water Power*, 2021, 37(6): 6-8. (in Chinese)
- [39] 崔激, 魏杰, 李国栋. 考虑粗骨料破碎的混凝土力学特性细观模拟[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(1): 50-56.
CUI W, WEI J, LI G D. Meso-simulation of mechanical properties of concrete considering coarse aggregate crushing [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(1): 50-56. (in Chinese)
- [40] 黄伟, 丁宇, 吕柏颖, 等. 粗骨料形状对水工混凝土强度性能影响试验研究[J]. *水力发电*, 2020, 46(8): 104-108, 113.
HUANG W, DING Y, LÜ B Y, et al. Experimental study on the influence of coarse aggregate shape on strength properties of hydraulic concrete [J]. *Water Power*, 2020, 46(8): 104-108, 113. (in Chinese)
- [41] 刘书贤, 魏晓刚, 王伟, 等. 再生粗骨料对再生混凝土性能的影响[J]. *建筑结构*, 2014, 44(14): 17-20.
LIU S X, WEI X G, WANG W, et al. Influence of recycled coarse aggregate on recycled concrete performance [J]. *Building Structure*, 2014, 44(14): 17-20. (in Chinese)