

DOI:10.3969/j.issn.2096-8248.2024.03.005

水泥-碱渣固化高含水率海相软土力学性质试验研究*

徐振红^{1,2}, 杨天凤¹, 江舜根², 于志龙², 赵晓晴^{1,3}, 张长杰², 曾强忠², 许传赓²

(1. 江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005; 2. 连云港市铁路事业发展中心, 江苏 连云港 222062;
3. 江苏省海洋资源开发研究院, 江苏 连云港 222005)

摘要:为了解决低剂量水泥单独固化高含水率海相软土早期强度不足及固废碱渣资源化利用率低等问题,采用水泥、碱渣联合固化高含水率软土。通过30种不同质量配比的无侧限抗压强度试验得出,水泥-碱渣固化高含水率海相软土试样的无侧限抗压强度不仅与水泥、碱渣的掺量有关,还受到软土含水率的控制。在无侧限抗压强度研究基础上,推荐优选配比(碱渣、软土、水泥质量比为30:70:6),其7d无侧限抗压强度为682.7 kPa。优选配比固化土的加州承载比(CBR)和回弹模量满足各级公路路基填料的指标要求。通过对高含水率软土中水的影响以及固化土级配和微观结构分析得出,水泥-碱渣固化高含水率软土的力学强度主要来源于碱渣吸水作用、碱渣骨架作用以及各组分材料化学反应的作用。化学作用产生的C-S-H, C-A-H和Aft等凝胶物质共同密实结构,提高固化土强度。研究结果可为固体废物固化高含水率软土在路基中的应用提供理论支持。

关键词:路基填料;高含水率海相软土;固化;碱渣;力学性质;需水性;机理

中图分类号:U416.1;X754 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-8248(2024)03-0034-09

引用格式:徐振红,杨天凤,江舜根,等.水泥-碱渣固化高含水率海相软土力学性质试验研究[J].江苏海洋大学学报(自然科学版),2024,33(3):34-42.

Experimental Study on the Mechanical Properties of Marine Soft Soil with High Water Content Solidified by Cement and Soda Residue

XU Zhenhong^{1,2}, YANG Tianfeng¹, JIANG Shungen², YU Zhilong², ZHAO Xiaoqing^{1,3},
ZHANG Changjie², ZENG Qiangzhong², XU Chuangeng²

(1. School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;
2. Lianyungang Railway Development Center, Lianyungang 222062, China;
3. Jiangsu Institute of Marine Resources Development, Lianyungang 222005, China)

Abstract: Cement and soda residue were used together to solidify marine soft soil with high water content, to solve the issues of insufficient strength in the early stage of high water content marine soft soil solidified by low-dose cement alone, and low utilization rate of solid waste-soda residue. Unconfined compressive strength (UCS) of 30 different mix mass proportions were tested. The UCS of solidified soil was not only related to the content of cement and soda residue but also controlled by the water content of soft soil. Based on the UCS of the solidified soil, optimizing mix proportion (soda residue, soft soil and cement mass ratio of 30:70:6) was recommended, its 7d

* 收稿日期:2024-01-05;修订日期:2024-04-23

基金项目:江苏省重点研发计划项目(BE2021681);连宿高速公路产学研项目(JOUH22089);连云港市重点研发计划项目(SF2230);江苏高校“青蓝工程”资助项目

作者简介:徐振红(1974—),男,黑龙江铁力人,高级工程师,研究方向为路基路面和桥梁工程,(E-mail)379440829@qq.com。

通信作者:赵晓晴(1981—),女,江苏连云港人,教授,博士,研究方向为固废资源化利用以及地基处理新技术,(E-mail)zxqjhd@jou.edu.cn。

UCS was 682.7 kPa. The California bearing ratio (CBR) and resilience modulus of the solidified soil with optimizing mix proportion met the index of highway subgrade filling at all levels. By analyzing the influence of water in soft soil with high water content and the gradation and micro-structure of solidified soil, it was concluded that the mechanical strength of solidified soil mainly came from the water absorption of soda residue, the skeleton of soda residue and the chemical reaction of each component material. The gel substances C-S-H, C-A-H, and Aft were produced by chemical action to jointly compact structure and improve strength. The results provide some theoretical support for the application of solid waste solidified soft soil with high water content in the subgrade.

Key words: subgrade filler; marine soft soil with high water content; solidification; soda residue; mechanical property; water requirement; mechanism

0 引言

国内滨海地区存在大量的海相软土^[1]。海相软土具有高含水率、高液限、高孔隙率、高压缩性及低强度等特点^[2-3],作为路基使用时,沉降变形大,需要对其进行处理^[4]。而固化技术^[5-6]是一种行之有效的处理手段。固化技术的关键是采用固化效率高、造价低的固化材料。固化材料种类繁多,其中水泥是最简单、方便和常用的固化材料之一^[7-8]。但是对于软土地区,由于软土天然含水率高,单独采用普通水泥固化软土时强度偏低,并不能取得理想的固化效果。

碱渣属于一般固体废弃物,是采用氨碱法生产纯碱时产生的废渣^[9],具有资源化可利用性^[10]。每生产1 t纯碱大约排放0.3~0.6 t废渣(视石灰石原料的好坏而定)^[11]。目前我国纯碱生产企业多采用氨碱法,占纯碱总产量的60%以上^[12],每年能产生大约 $(7.8\sim 10.0)\times 10^6$ t的碱渣^[13],并且随着生产技术的提高,纯碱的产量逐年提高,这导致碱渣的存量日益增加,随之而来其堆存和排放也成为严重的资源和环境问题^[14]。碱渣的主要成分为 CaCO_3 ^[15],其性质稳定、吸水性强。水泥、碱渣联合固化高含水率海相软土,优势叠加,可以取得比水泥单独固化更好的技术效果,不仅可以降低固化材料的成本,还能拓展碱渣资源化利用的途径,从而缓解环境污染问题^[16-17]。

碱渣固化软土的研究相对较少。邵勇等^[18]将碱渣与风干淤泥混合配置含水率为30%的混合土,随着碱渣掺量的提高混合土的强度随之提高,但当碱渣掺量达12%之后,混合料的强度提高速度变

缓。张鹏等^[19]按不同配比的最优含水率配置水泥-碱渣固化软土,其无侧限抗压强度随着水泥掺量的增加而提高,而随着碱渣掺量的提高先增加后降低,存在一个峰值,所对应碱渣掺量为30%。许士钊^[20]采用水泥和碱渣共同固化软土,水泥、碱渣掺量分别为12%和15%,在混合土最优含水率情况下,水泥、碱渣质量比为10:0和8:2时,试样强度较高。何俊等^[21]混合碱渣、矿渣和水玻璃3种材料对疏浚淤泥(含水率110%)进行复合固化,当水玻璃掺量一定而碱渣($\leq 30\%$)与矿渣总掺量相同时,碱渣对固化淤泥的作用强于矿渣。王小琦^[22]选择掺量分别为17.6%,30%,42.9%,60%,81.8%(质量比)的碱渣固化淤泥(含水率80%),发现42.9%掺量的碱渣具有较好的固化效果。孙家瑛等^[23]以碱渣、矿渣、粉煤灰等固体废弃物为主要原材料,并掺入适量脱硫石膏及少量复配激发剂,用以固化连云港地区淤泥质土(含水率62.4%),得出该固化剂掺比2%的固化土工程特性基本与水泥掺比10%左右的固化土相当。杨朝旭等^[24]利用4%水泥、4%碱渣、20%废混凝土改性72%的淤泥质土(含水率24.7%),7 d无侧限抗压强度(UCS)为222.50 kPa,加州承载比(CBR)为101.8%。

由上述分析可知,固化软土的力学性质不仅与固化材料、软土的性质有关,也与软土的含水率密切相关。因此在研究水泥-碱渣固化高含水率软土的力学性质时,不仅需要研究固化土各组分材料的性质和掺量的影响,同时也需重视软土含水率的影响。

鉴于此,本文采用30种不同质量配比,研究不同对比对水泥-碱渣固化高含水率海相软土(固化土)7 d无侧限抗压强度的影响。在无侧限抗压强度研究基础上,推荐优选配比,并对其进行CBR和

回弹模量试验,分析固化土的力学性质,从不同角度(宏观、微观等)对水泥-碱渣固化高含水率软土的力学机理进行探讨。

1 试验材料及方法

1.1 碱渣和高含水率软土

碱渣取自连云港碱业有限公司碱渣库,为自然排放湿渣,呈灰白色粉末状,如图1所示。其天然含水率为22.4%,液、塑限分别为70.4%和41.2%。原状碱渣经高温105℃烘干,通过碎土机粉碎后过4.75 mm筛备用,如图2所示。如表1所示,碱渣的主要化学成分为 CaCO_3 , CaCl_2 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和 NaCl 等。



图1 连云港地区碱渣库

Fig. 1 Soda residue storage of Lianyungang area



图2 烘干粉碎后碱渣

Fig. 2 Soda residue after drying and crushing

表1 碱渣化学成分

Table 1 Chemical composition of soda residue

成分	CaCO_3	CaCl_2	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	NaCl	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	MgCl_2
含量/%	53.1	12.5	7.0	6.3	6.0	4.7
成分	CaSO_4	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	其他	
含量/%	2.3	1.9	1.1	0.8	4.3	

试验土样为连云港地区海相软土,取自徐圩区航道疏浚淤泥。土样在天然状态下含水率为100.2%,呈黄灰色流塑状,液、塑限分别为76.2%和29.5%。水泥采用普通硅酸盐水泥,强度等级为42.5 MPa。

1.2 试验方案与方法

1.2.1 试验方案 根据无侧限抗压强度结果推荐优选配比,对优选配比进行不同压实度下的CBR和回弹模量试验。试验方案如表2所示。

表2 试验方案

Table 2 Test scheme

编号	碱渣含量/%	黏土含量/%	水泥含量/%
1	0	100	
2	10	90	
3	20	80	
4	30	70	0.2, 4, 6, 8
5	40	60	
6	50	50	

1.2.2 试验方法 (1) 材料准备。固化土各组分比例采用质量比,碱渣和软土为内掺,水泥为外掺。按表2配比方案称量碱渣、原状高含水率海相软土,采用搅拌机搅拌3~5 min,将两者均匀拌和,然后加入适量水泥,搅拌3 min,达到三者均匀拌和。

(2) 力学性质试验。无侧限抗压强度试验采用高8 mm、内径39.1 mm的三瓣模进行制样。混合土分3层装入,每层振动约2 min,排出气泡后再装入下一层,直到装满为止。将混合土标准养护24 h后脱模,再密封养护至7 d,根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)^[25]要求进行试验。

击实试验前,所用材料均需烘干。采用电动击实仪,分5层击实成体积为997 cm³的圆柱形试样。CBR试样为直径152 mm、高120 mm的圆柱形试样。通过压力机压制成型,随后浸水养护4 d。回弹模量试样尺寸及成型方式与CBR一致,成型后在标准养护室内养护7 d,击实、CBR与回弹模量试验均按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[26]要求进行。

(3) 微细观试验。对试验材料和优选配比固化土进行化学成分、矿物成分分析,同时进行粒径分析、电镜扫描,观察其微细观结构,揭示固化机理。采用PANalytical zetium型X射线荧光光谱仪(XRF)对碱渣化学成分进行测试。采用日本理学

smartlab9 型 X 射线衍射仪(XRD)分析碱渣和软土的矿物组成。粒径分析采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪,选用干法进行测试。电镜扫描采用 tescan mira4 型场发射扫描电子显微镜(SEM)进行。

2 结果与讨论

2.1 固化土无侧限抗压强度

水泥-碱渣固化高含水率海相软土的无侧限抗

压强度试验结果见表 3。

2.1.1 单掺水泥 由表 3、图 3 可以看出,当水泥掺量分别为 0%和 2%时,在该软土含水率条件下,固化土基本无强度;当水泥掺量分别为 4%和 6%时,试样抗压强度均低于 100 kPa;即使当水泥掺量为 8%时,试样抗压强度也仅为 147.9 kPa。

单掺水泥的情况下,固化土试样强度随着水泥掺量的增加而提高,但不同水泥掺量的试样强度均较低,达不到理想的固化效果。

表 3 水泥-碱渣固化高含水率海相软土的无侧限抗压强度

Table 3 UCS of cement-soda residue solidified marine soft soil with high water content

水泥掺量/%	碱渣掺量/%					
	0	10	20	30	40	50
0	0	25.2	42.3	43.6	61.2	40.3
2	0	42.1	102.7	185.6	163.2	146.2
4	34.7	131.0	213.4	483.3	464.5	188.4
6	85.4	282.2	346.1	682.7	376.0	147.1
8	147.9	423.5	574.5	949.3	234.1	58.6

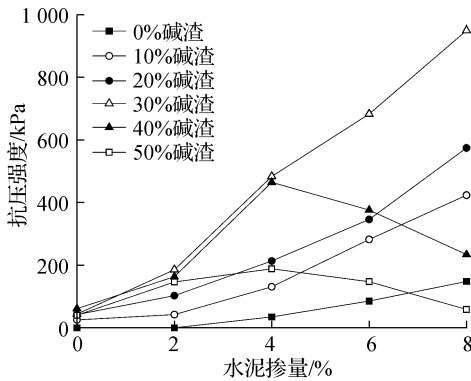


图 3 水泥及碱渣掺量对无侧限抗压强度的影响

Fig. 3 Influence of cement and soda residue content on unconfined compressive strength

2.1.2 复掺水泥、碱渣 如图 3 所示,当碱渣掺量 $\leq 30\%$ 时,固化土强度随着水泥掺量的增加而提高。当碱渣掺量为 30%,水泥掺入量为 6%时,强度达到 682.7 kPa,水泥掺入量为 8%时强度最高,达到 949.3 kPa。比起单掺水泥,复掺水泥、碱渣的固化土强度大幅度提高,达到单掺的 4~14 倍。

当碱渣掺入量为 40%和 50%时,固化土抗压强度并不是随着水泥掺量的增加而一直提高。在水泥掺量 $\leq 4\%$ 时,固化土试样强度继续保持增加趋势,但速率放缓;水泥掺量达到 6%和 8%时,碱渣的继续掺入反而降低了固化土的强度;8%水泥掺量时,40%碱渣掺量的固化土强度仅有 234.1 kPa,而

50%碱渣掺量的固化土强度也仅有 58.6 kPa。

2.1.3 优选配比 综合考虑强度、经济性以及实际工程中水泥的常用掺量,确定优选配比为水泥掺量 6%,碱渣、软土质量比为 30:70。对优选配比进行击实,则最大干密度为 1.51 g/cm^3 ,最优含水率为 27.78%。

2.2 路用性能

加州承载比(CBR)试验制样过程中,通过锤击次数(30,50,98次)调整试样的压实度,测试优选配合比固化土在不同压实度下 CBR 值和回弹模量的变化情况,结果见表 4。

表 4 优选配比固化软土的 CBR

Table 4 CBR of solidified soft soil with optimal proportion

击实数量/次	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	压实度/ %	CBR/%	回弹模量/ MPa
30	1.36	92.05	23.58	90.48
50	1.40	95.36	30.07	94.25
98	1.51	100.00	41.29	115.37

由表 4 可以看出,随着锤击次数的增加,固化土的压实度增加,CBR 值和回弹模量也随之增加。固化土的 CBR 值满足高速公路上路床的承载比要求^[27],回弹模量满足极重交通荷载下的路基顶面回弹模量的要求^[28-29]。由此可见,固化土的路用性能良好。

3 力学机理探讨

本文采用水泥、碱渣联合固化高含水率海相软土,上述分析表明,水泥和碱渣的作用不同,对固化土的强度贡献有所差异,因此其力学机理也有所不同。水泥、碱渣联合固化高含水率海相软土力学机理的影响因素较多,本文主要从以下3个方面进行阐述:从宏观方面分析高含水率海相软土中水的影响作用、从细观方面分析碱渣的骨架作用、从微观方面分析各组分材料性质及其化学反应的作用。

3.1 软土中水的影响

水泥-碱渣固化高含水率海相软土的强度宏观机理源于原材料对软土中水的消耗,其中占主导地位的是碱渣的强吸水性。

3.1.1 水泥-碱渣固化土含水率 在试验过程中并未额外加水,所以水泥-碱渣固化土的水就是软土中的水。因此,随着配比不同,固化土含水率也不同,计算公式为

$$\omega_{gh} = \frac{m_s \omega}{m_c + m_r + m_s} \times 100\% = \frac{\alpha_s \omega / (1 + \omega)}{\alpha_c + \alpha_r + \alpha_s} \quad (1)$$

$$m_c = [m_s(1 + \omega) + m_r] \alpha_c,$$

$$m_r = [m_s(1 + \omega) + m_r] \alpha_r,$$

$$m_s = [m_s(1 + \omega) + m_r] \alpha_s / (1 + \omega) \quad (2)$$

式中: ω_{gh} 为固化土的含水率; ω 为软土含水率; m_s 为软土干质部分质量; m_c 为水泥质量; m_r 为碱渣质量; α_s 为软土掺量; α_c 为水泥掺量; α_r 为碱渣掺量。

由式(1)求出水泥-碱渣固化土的含水率,如表5所示。随着水泥、碱渣掺量的增加,固化土的含水率随之降低。试验过程中并未额外加水,所以固化土的含水率完全来源于软土中水,随着碱渣和水泥掺量的增加,固化土中干质部分增加,而水并未增加,因此含水率降低。

3.1.2 水泥-碱渣固化土需水率 碱渣润湿需水(吸水)、软土干质部分润湿需水、水泥水化需水,因此固化土势必存在一个需水率^[30]。

水泥-碱渣固化土需水量可以表示为

$$m_{wt} = m_{wc} + m_{wr} + m_{ws}, \quad (3)$$

$$m_{wc} = m_c k_c,$$

$$m_{wr} = m_r k_r,$$

$$m_{ws} = m_s k_s \quad (4)$$

由式(3)、式(4)推导出水泥-碱渣固化土的需水

率公式(5)。当配比中每一组分的需水率采用最优需水率时,总需水率即为最优总需水率,即

$$\omega_{wt} = \frac{m_{wt}}{m_c + m_r + m_s} \times 100\% = \frac{\alpha_c k_c + \alpha_r k_r + \alpha_s k_s / (1 + \omega)}{\alpha_c + \alpha_r + \alpha_s / (1 + \omega)} \quad (5)$$

式中: ω_{wt} 为固化土需水率; m_{wt} 为总需水量; m_{wc} 为水泥水化需水量; m_{wr} 为碱渣需水量; m_{ws} 为软土干质部分润湿需水量; k_c 为水泥最优需水率,根据文献确定为18%^[31]; k_r 为碱渣最优需水率,采用击实最优含水率44.95%; k_s 为软土干土最优需水率,采用击实最优含水率19.13%。

由式(5)求出水泥-碱渣固化土的最优需水率见表5。随着碱渣掺量的增加,固化土的最优需水率随之增加;而随着水泥掺量的增加,固化土最优需水率随之降低,因为水泥需水率只有18%。

表5 水泥-碱渣固化土含水率和需水率

Table 5 Water content and requirement of cement-soda residue solidified soil

碱渣掺量/%	水状态	水泥掺量/%				
		0	2	4	6	8
0	含水率/%	50.00	49.02	48.08	47.17	46.30
	需水率/%	19.13	19.08	19.04	19.00	18.97
10	含水率/%	45.00	44.12	43.27	42.45	41.67
	需水率/%	23.82	23.62	23.43	23.25	23.08
20	含水率/%	40.00	39.22	38.46	37.74	37.04
	需水率/%	27.73	27.42	27.13	26.85	26.59
30	含水率/%	35.00	34.31	33.65	33.02	32.41
	需水率/%	31.04	30.65	30.29	29.94	29.61
40	含水率/%	30.00	29.41	28.85	28.30	27.78
	需水率/%	33.88	33.44	33.02	32.63	32.25
50	含水率/%	25.00	24.51	24.04	23.58	23.15
	需水率/%	36.34	35.87	35.41	34.98	34.57

取优选配比进行击实验证,优选配比的理论最优需水率为29.94%,击实最优含水率(实际需水率)为27.78%,仅相差2.16个百分点,与理论需水率相近,证明固化土需水率理论分析可行。

3.1.3 需水率与含水率比较 当固化土的需水率小于固化土含水率时,则固化土中的水可以满足材料润湿和水化的需要;此时,提高固化材料(碱渣、水泥)的掺量可以提高固化土的强度。反之,当固化土的需水率大于固化土含水率时,则固化土中的水难以满足材料润湿和水化的需要;此时,提高固化材料的掺量反而降低了固化土的强度,因为固化材料掺量的增加进一步消耗了原本就不满足需要的水。

如图 4 所示,碱渣吸水性大,在碱渣掺量 $\leq 30\%$ 时,碱渣能够快速吸收软土中的水,同时又不影响水泥水化反应的发生,因此固化土的抗压强度能够随着水泥掺量的增加而不断提高。但是碱渣掺量达到 40% 以上时,碱渣所吸水分增加,会加速吸收软土中的水,从而导致水泥水化所需水分减少,影响水化反应的发生,导致固化土强度降低。

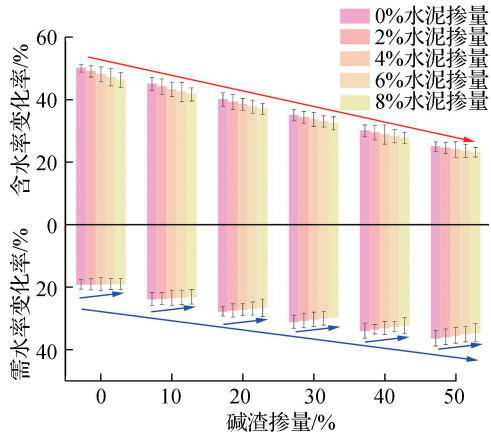


图 4 水泥-碱渣固化土需水率、含水率比较

Fig. 4 Comparison of water requirement and content of cement-soda residue solidified soil

高含水率海相软土固化土作为路基填料时,其含水率通常高于最优含水率,因此需要摊铺晾晒。而晾晒所需时间与天气有关,难以人为掌控。利用固化土需水率与含水率之间的关系,可以明确合适的碱渣掺量,使其需水率与含水率接近,达到减少晾晒时间或无需晾晒的目的,从而缩短施工时间,提高施工效率。

3.2 碱渣骨架作用

采用激光粒度仪,分别对碱渣、软土、混合土(碱渣、软土质量比为 30:70)进行颗粒分析,结果如图 5 所示。软土颗粒粒径小,具有填充作用。碱渣颗粒粒径大,具有骨架作用。混合土(碱渣、软土质量比为 30:70)的级配曲线介于两者之间,说明碱渣和软土混合以后,碱渣和软土粒径大小互为补充,形成了一种碱渣骨架、黏土填充的密实结构。优选配比固化土试样的无侧限抗压强度最高,不仅是由于该配比的固化土需水率与含水率相近,可以利用碱渣高吸水性吸收软土中的高含量的水,软土中剩余水又能恰好满足水泥水化需求;而且在该配比下,碱渣能够充分体现其骨架支撑作用,软土颗粒可以填充松散碱渣颗粒之间的大孔隙,从而形成密实的混合土体结构。

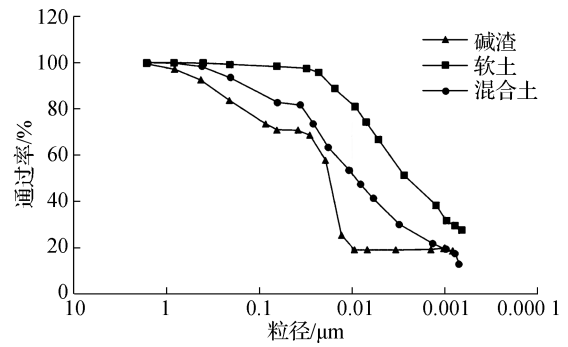
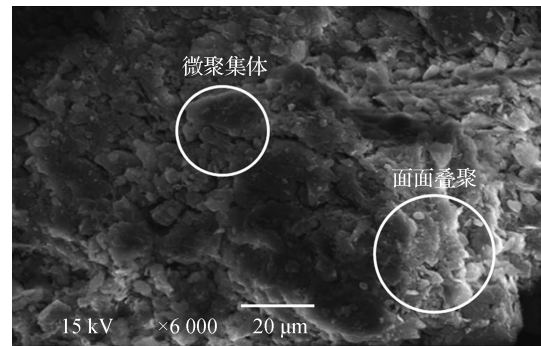


图 5 材料颗粒分析试验结果

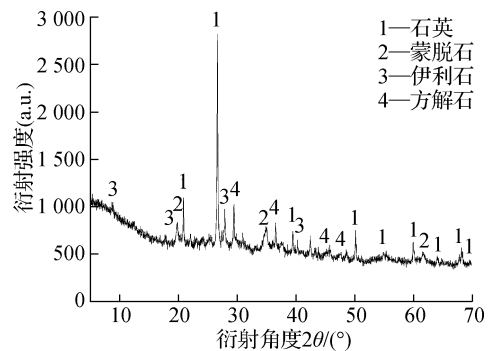
Fig. 5 Material particle analysis test results

3.3 微观结构分析

对比分析优选配比的固化土、碱渣和软土的微观形貌,探究各组对固化土力学性质的影响机理。
3.3.1 微观形貌分析 软土的基本单元体呈现鳞片状^[32],若干个鳞片状单元组成了微聚集体即软土颗粒,粒径主要集中在 0.7~10 μm 间。它们以面面叠聚和面面叠聚等形式接触,颗粒连接紧密。软土 SEM 扫描结果见图 6a。软土的主要矿物成分为石英、蒙脱石、伊利石和方解石,XRD 测试结果见图 6b。



a 软土 SEM 扫描结果

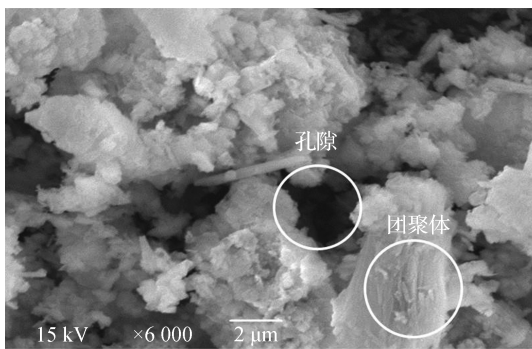


b 软土 XRD 测试结果

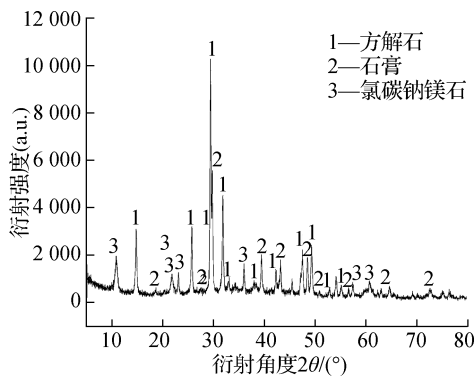
图 6 软土电镜扫描和 XRD 测试结果

Fig. 6 Electron microscope scanning and XRD results of soft soil

碱渣整体结构松散,颗粒分布杂乱,连接较弱,孔隙大而丰富,成蜂窝状。碱渣颗粒是由粒径 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 的块状或片状颗粒团聚而成,团聚体的粒径大部分在 $10\sim 74\ \mu\text{m}$ 之间^[33]。碱渣 SEM 扫描结果如图 7a 所示,XRD 测试结果如图 7b 所示。碱渣的矿物成分以方解石和石膏为主。碱渣较高的 pH 会形成碱性环境,加之较高的钙含量,使其与软土混合后,不仅发生离子交换反应,更加快了其与软土之间的火山灰反应,生成大量的水化产物,填充孔隙,密实结构。



a 碱渣 SEM 扫描结果



b 碱渣 XRD 测试结果

图 7 碱渣电镜扫描和 XRD 测试结果

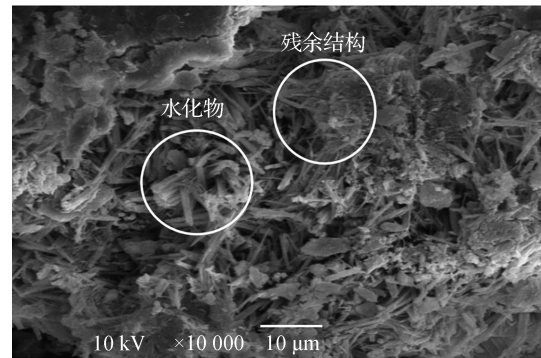
Fig. 7 Electron microscope scanning and XRD results of soda residue

相比碱渣的微观形貌,优选配比混合料的孔隙明显减小,材料致密性有很大改善,这是黏土颗粒对碱渣孔隙进行填充的结果。从优选配比混合料的微观结构中能够观察到碱渣和软土的残余结构,但两者的特征都不再明显,而纤维状、棒状、针状的水泥水化物清晰可见。固化土 SEM 扫描结果如图 8a 所示。为进一步明确水化产物的类型,对水化产物进行扫描,EDS 扫描结果如图 8b 所示。其中,O,Si,Ca 和 Al 等

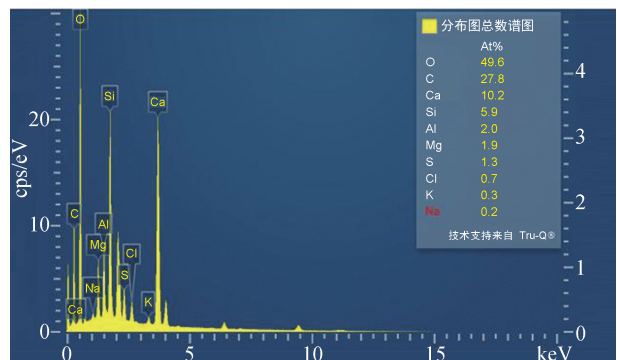
元素含量较高,对比电镜扫描结果可以判定,棒状和针状水化产物为 Aft,纤维状水化产物为 C-A-H 和 C-S-H,此外,还含有少量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaSO_4 。

3.3.2 微观机理分析 (1) 碱渣吸水作用。碱渣颗粒由块状或片状颗粒团聚而成,团聚体的粒径大;且晶体杂乱交错,连接差,因此内部的孔隙大;基于以上两个原因,碱渣孔隙对水有很强的吸附作用,这和碱渣宏观的强吸水性相对应。

(2) 级配互补作用。碱渣颗粒大,可以形成骨架结构。软土粒径比碱渣颗粒及颗粒间孔隙都要小,可以填充在碱渣孔隙之间,增加材料的整体性和密实性,形成一种碱渣骨架、软土填充的密实结构。这与其级配分析结果相呼应。



a 固化土 SEM 扫描结果



b 固化土 EDS 扫描结果

图 8 固化土微观结构与成分

Fig. 8 Micro-structure and composition of solidified soil

(3) 水泥胶凝作用。水泥主要起胶凝作用,水泥水化物呈短柱状和纤维网状,对周围颗粒起到了连接和加筋作用。水泥水化生成的水化物将起骨架作用的碱渣、填充作用的软土混合土体进行进一步胶结、包裹、密实,形成较大的团粒体,而团粒体又由水泥水化物进一步联结,形成更大的胶团。

(4) 火山灰作用。碱渣具有一定胶凝性,其有效成分主要是 CaCO_3 , CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaSO_4 。碱渣的 pH 为 9.4, 大于 7。将碱渣引入高含水率海相软土中进行固化,其创造了碱性激发环境,有利于促进水泥的水化作用;同时注入了可溶性 Ca^{2+} , 与软土中的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 生成 C-S-H, C-A-H 和 Aft 等胶凝物质,有利于土颗粒之间的胶结作用。

4 结论

本文主要研究了水泥-碱渣联合固化高含水率海相软土的力学性质及其固化机理。通过无侧限抗压强度试验推荐优选配比,测试优选配比固化土在不同压实度下的 CBR 和回弹模量,采用宏观、细观、微观研究手段分析其固化机理,得到如下结论。

(1) 高含水率海相软土单独采用低剂量水泥进行固化时,效果不理想,可以联合工业固废-碱渣进行复合固化,改善高含水率海相软土的力学性质。

(2) 综合考虑强度、工程应用和经济性,推荐优选配比(水泥掺量 6%, 碱渣和软土质量比为 30:70),此时固化土强度达到 682.7 kPa,最大压实度下, CBR 和回弹模量分别为 41.29% 和 115.37 MPa,均满足各级公路路基填料指标。

(3) 水泥-碱渣固化高含水率海相软土,其固化强度主要来源于碱渣的吸水作用、碱渣的骨架作用和水化物的胶凝作用。

(4) 水泥-碱渣固化高含水率海相软土的强度受到软土含水率的影响。当固化土需水率低于含水率时,随着水泥、碱渣掺量的增加,其强度增加;当固化土需水率高于含水率时,随着水泥、碱渣掺量的增加,其强度显著降低。

(5) 碱渣粒径大于软土粒径,有利于形成骨架结构,软土可以填充碱渣的孔隙,而水泥水化物对整个结构进一步填充、包裹、胶结,形成骨架密实结构。碱渣形成碱性激发环境、提供游离 Ca^{2+} , 促进水化物进一步产生,最终形成固化土的稳定结构。

碱渣为一般固废,与水泥联合固化高含水率海相软土用作路基填料具有显著的经济、环保优势,但目前对软土中水的影响及路用性能研究仍较少。另外,现场实际施工时,固化土的施工工艺、耐久性等方面尚需进一步研究。

参考文献:

[1] 阎长虹,吴焕然,许宝田,等. 不同成因软土工程地质特

性研究——以连云港、南京、吴江、盱眙等地四种典型软土为例[J]. 地质论评, 2015, 61(3): 561-569.

[2] 中国建筑科学研究院. 软土地区岩土工程勘察规程: JGJ 83—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[3] 邓永锋,吴燕开,刘松玉,等. 连云港浅层海相软土沉积环境及物理力学性质研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 29-33.

[4] 李明东,赵晓晴,张振东,等. 海涂厚层盐渍淤泥地基工程建设技术研究[J]. 南京理工大学学报, 2015, 39(6): 750-755.

[5] 邓永锋,赵余,刘倩雯,等. 钢渣的硅系与复合系激发及其在软土固化中的应用[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 11-20.

[6] CORRÊA-SILVA M, MIRANDA T, ROUAINIA M, et al. Geomechanical behaviour of a soft soil stabilised with alkali-activated blast-furnace slags[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 267: 122017.

[7] CHAIYAPUT S, ARWAEDO N, KINGNOI N, et al. Effect of curing conditions on the strength of soil cement[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e01082.

[8] 王东星,陈政光. 氯氧水泥固化淤泥力学特性及微观机制[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 77-85.

[9] 茅爱新. 氨碱法纯碱生产中废液及碱渣的综合利用[J]. 化学工业与工程技术, 2001, 22(2): 31-32.

[10] UÇAL G O, MAHYAR M, TOKYAY M. Hydration of alinite cement produced from soda waste sludge [J]. Construction and Building Materials, 2018, 164: 178-184.

[11] 侯晋芳. 碱渣代替工程土进行填垫的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.

[12] GOMES H I, MAYES W M, ROGERSON M, et al. Alkaline residues and the environment: a review of impacts, management practices and opportunities [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 3571-3582.

[13] ZHAO Xianhui, LIU Chunyuan, WANG Li, et al. Physical and mechanical properties and micro characteristics of fly ash-based geopolymers incorporating soda residue[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 98: 125-136.

[14] HULISZ P, PINDRAL S, KOBIERSKI M, et al. Technogenic layers in organic soils as a result of the impact of the soda industry[J]. Eurasian Soil Science, 2018, 51(10): 1133-1141.

[15] 刘华,梁腾,赵晓晴,等. 碱渣土的击实特性[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2022, 31(4): 84-88.

[16] 梁腾. 基于正交试验的碱渣土路用性能研究[D]. 连

- 云港:江苏海洋大学,2023.
- [17] ZHAO Xiaoqing, YANG Tianfeng, LIANG Teng, et al. Mechanical properties and dry-wet stability of soda residue soil[J]. Buildings, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023, 13(10): 2407.
- [18] 邵勇,刘小丽,朱进军. 碱渣改良海相软土试验研究[J]. 水力发电,2019,45(4):120-124.
- [19] 张鹏,赵晓晴,蒋德稳,等. 碱渣土无限限抗压强度和水稳定性试验研究[J]. 公路,2020,65(2):212-218.
- [20] 许士钊. 水泥-碱渣加固软土的试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.
- [21] 何俊,石小康,栗志翔. 水玻璃-碱渣-矿渣固化高含水率淤泥的强度性质[J]. 工程地质学报,2019,27(4): 729-736.
- [22] 王小琦. 碱渣-矿渣固化淤泥的工程性质试验研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.
- [23] 孙家瑛,顾昕. 新型无熟料碱渣固化土的工程特性[J]. 建筑材料学报,2014,17(6):1031-1035.
- [24] 杨朝旭,解建光. 碱渣、废混凝土改性淤泥质土作为路基填土的可行性研究[J]. 公路工程,2010,35(1):72-75.
- [25] 中华人民共和国交通运输部. 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.
- [26] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [27] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范:JTG D30—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [28] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S]. 北京:人民交通出版社,2017.
- [29] 中华人民共和国交通运输部. 公路水泥混凝土路面设计规范:JTG D40—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [30] 朱伟,李明东,张春雷,等. 砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率[J]. 岩土工程学报,2009,31(1): 21-25.
- [31] LEE F A. The Chemistry of Cement and Concrete [M]. New York: Hodder Arnold, 1970.
- [32] ZHAO Xiaoqing, ZHAO Gui, LI Jiawei, et al. Unconfined compressive strength property and its mechanism of construction waste stabilized lightweight soil [J]. Geomechanics & Engineering, 2019, 19(4): 307-314.
- [33] LI Congbo, LIANG Yuhang, JIANG Linfeng, et al. Characteristics of ammonia-soda residue and its reuse in magnesium oxychloride cement pastes [J]. Construction and Building Materials, 2021, 300: 123981.

(责任编辑:褚金红 实习编辑:易圣杰)

郑重声明

为了适应我国信息化建设发展的需要,有力地促进科研学术信息交流和信息资源开发利用的有效性,严肃科学研究成果发布的科学化和规范化,从根本上杜绝和防范学术不端行为发生,打击学术成果造假和学术剽窃,本刊根据已先后加入《中国核心期刊(遴选)数据库》《中国期刊网》《中国学术期刊(光盘版)》《中国学术期刊综合评价数据库》“万方数据网”和“万方数据——数字化期刊群”,以及《中文科技期刊数据库》《教育阅读网》全文收录期刊序列的实际情况,从2011年6月30日起,正式签约并执行“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”(简称《暂行办法》)。同时在此郑重声明,本刊根据《暂行办法》的规定,要求投稿本刊的所有作者应自觉查阅和遵守相关规定要求,并按照文责自负的原则对所投稿件承担相应学术责任,一经“学术不端文献检测系统”(简称 AMLC)检测发现有严重抄袭、一稿多投,或不当署名、伪造、篡改等学术不端行为者,均在本刊所加入的文献收录数据库和文献资料信息存储单位中自动删除该文献,并在此基础上由作者承担因学术不端行为所造成的其他后果。

特此声明,望所有投稿本刊的作者充分理解和自觉遵守,同时知会其他同行和好友悉知。

《江苏海洋大学学报(自然科学版)》编辑部