

碳化条件下电石渣-氧化镁固化淤泥土的试验研究

郑晨晖¹, 蔡光华^{2,3}, 钟煜清², 杜广印⁴

(1. 江苏省交通工程建设局, 南京 210004; 2. 南京林业大学 土木工程学院, 南京 210037;
3. 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 4. 东南大学 交通学院, 南京 211189)

摘要:软土是一种分布广泛的工程性质差的土类,使用水泥对其进行固化处理已不再符合当今社会发展要求。采用电石渣-活性 MgO 复合固化剂及 CO₂ 气体对淤泥质土进行碳化固化处理,设置固化剂掺量(单掺电石渣)及固化剂掺和比(电石渣:MgO)两组变量,从物理力学和化学等方面分析碳化固化土的工程性质。结果表明:①当单掺电石渣含量为 20% 时,碳化土体强度最高;掺入混合固化剂时,碳化后试样强度随电石渣掺入比的升高呈先上升后下降趋势;②碳化后试样密度较碳化前有显著增长,单掺电石渣时,碳化后试样密度随电石渣掺量的增加而增加;掺入混合固化剂时,碳化试样密度的变化规律与强度变化一致;③碳化土的 pH 较碳化前有显著下降,单掺电石渣时,碳化土的 pH 随电石渣掺量的增加而增加,掺入电石渣:MgO=4:3 的混合固化剂时,碳化土 pH 明显减小;④碳化土样的粗颗粒(>75 μm)含量显著提高,碳化土样的粗颗粒比例随固化剂掺量增加而降低,但掺入混合固化剂时,碳化土样的粗颗粒比例与电石渣和 MgO 比例无显著相关性。研究结果有利于提高电石渣固废的资源化利用,拓展电石渣-MgO 碳化固化技术在软土处理中的工程应用。

关键词:电石渣;活性 MgO;碳化固化;无侧限抗压强度;颗粒级配

中图分类号:TU43 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)09-0233-06

软土是中国分布范围最广的土体,常有高灵敏度、高压缩性、低强度和低渗透性等不良性质而需进行处理,以满足工程建设需求^[1]。常见软土地基处理方法有置换法、致密法、排水法、固化法和加筋法等,且以水泥搅拌桩技术应用最广^[2]。但将水泥用作软土固化剂有如下缺陷:①水泥水化速度慢,固化效率低,需养护 28 d 才能达到设计强度^[3];②水泥固化土的耐久性差,尤其在冻融循环作用下,其强度下降较大^[4];③软土中常含有机质,会严重阻碍水泥水化而使固化土的强度无法正常形成^[5]。此外,水泥生产过程会消耗大量不可再生资源并排放温室气体,逐年增加的水泥产量和用量给全球节能减排带来了巨大挑战。因此,寻找一种绿色低碳的新型固化剂替代水泥进行软土地基处理成为趋势^[6]。

近年来,活性 MgO-CO₂ 碳化固化技术和碱激发固化技术逐渐受到关注。碳化固化技术是向活性 MgO-软土混合物中通入 CO₂ 来实现软土的加固,具

有强度增长快,抗侵蚀能力强及低碳环保等优点^[7-8]。但 MgO 的活性制约着碳化技术的推广:高活性 MgO 成本高,而低活性 MgO 会导致碳化反应后强度不足,土体强度无法快速形成。因此,亟需寻找一种辅助添加剂部分代替活性 MgO 对软土进行碳化固化处理。顾海荣等^[9]用偏高岭土基聚物来改良土体,通过强度试验分析了地聚物组分对改良土力学特性及固化效果的影响,改良土强度随偏高岭土和碱激发剂掺量的增加呈先增加后减小的趋势,两者的最优配比为 2:1,地聚物改良土强度优于普通硅酸盐水泥土和黏土。尚高鹏等^[10]用再生聚酯纤维与无机固化剂来有效提高路基粉土的路用性能,掺入 0.2% 纤维改良土的 CBR(加州承载比)达到 45%,无侧限抗压强度值可达到 900 kPa。电石渣是生产乙炔、PVC(聚氯乙烯)等化工产品时产生的工业废渣,其产量巨大,通常以简单堆放为主,易造成土壤严重钙化或空气质量下降等环境问

收稿日期:2022-11-29

基金项目:国家自然科学基金(41902286);岩土力学与工程国家重点实验室开放基金课题(SKLGME021029,Z019026);长江科学院开放研究基金(CKWV20221015/KY)。

作者简介:郑晨晖(1974—),男,福建漳州人,江苏省交通工程建设局,高级工程师,研究方向为岩土工程与地基处理;通信作者蔡光华(1985—),男,河南宜阳人,南京林业大学土木工程学院,副教授,工学博士,硕士研究生导师,研究方向为环境岩土和特殊土处理;钟煜清(1998—),男,江苏常州人,南京林业大学土木工程学院,硕士研究生,研究方向为特殊土低碳处理和环境岩土;杜广印(1964—),男,江苏徐州人,东南大学交通学院,教授,博士,研究方向为地基处理。

题,因此开展电石渣的再利用具有重要的现实意义^[11]。电石渣的主要成分为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,是一种类石灰材料,常与水泥、粉煤灰等混合用作路基填料;同时还单独用于酸性废水处理和特殊土改良领域^[12-13]。栗培龙等^[14]用电石渣稳定细粒土在电石渣掺量为 5%~9%,电石渣稳定土强度随养生温度升高而增大,并建立了基于压实度和养生条件提出了无侧限抗压强度的预估模型。已有研究表明电石渣在土体改良中的可行性。

结合活性 $\text{MgO}-\text{CO}_2$ 碳化技术及工业废料电石渣的优势,开展电石渣-活性 MgO 碳化固化软土的研究,并以无侧限抗压强度作为软土加固效果的评价标准,探索电石渣掺入对固化土的影响以及最优固化剂掺和比。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验用土为淤泥土,取自江苏省无锡市某高速公路施工现场,其主要物理-化学性质见表 1;所用活性 MgO 为高活性 MgO ,由邢台镁神化工有限公司生产,其外观呈乳白色且颗粒细腻;所用电石渣来自江苏省宜兴市张渚镇神牛特种气体有限公司,外观呈白色粉末。其中,试验土样及活性 MgO 的化学组成见表 2,各试验材料外观如图 1 所示。

表 1 试验土样的物理化学指标

天然含水率/%	液限/%	塑限/%	天然密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	烧失量/%	初始孔隙比	pH
50~65	46	20	1.71	3~5	0.92	7.4

表 2 试验材料的主要化学成分含量

类别	含量/%						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	MgO	TiO_2
试验土	69.79	17.84	5.34	2.05	1.11	1.04	1.00
活性 MgO	3.91	1.43	0.3	0.04	1.26	91.8	0.13

1.2 试验方案

依据已有研究^[6,15],试验设初始含水率为 25%,碳化时间为 12 h,碳化 CO_2 通气压力为 200 kPa,并设有 2 个变量:固化剂掺量(15%、20%、25%)和固化剂掺和比(电石渣:活性 $\text{MgO}=0:1$ 、1:3、2:3、3:3、4:3)。具体试验方案见表 3。

表 3 中 B_xCM_{yz} 代表固化剂(B)掺量为 $x\%$,固化剂中电石渣(C):活性 $\text{MgO}(\text{M})$ 的掺和比为 $y:z$ 。其中,前 3 组为研究电石渣自身碳化固化软土性能的试验组;后 5 组为研究不同电石渣:活性 MgO 掺和比下碳化固化土性质的试验组。



(a) 试验土



(b) 活性 MgO



(c) 电石渣

图 1 试验主要材料外观

表 3 不同条件影响下的试验方案

编号	固化剂掺量/%	掺和比 (电石渣:活性 MgO)
$\text{B}_{15}\text{CM}_{01}$	15	1:0
$\text{B}_{20}\text{CM}_{01}$	20	1:0
$\text{B}_{25}\text{CM}_{01}$	25	1:0
$\text{B}_{20}\text{CM}_{01}$	20	0:1
$\text{B}_{20}\text{CM}_{13}$	20	1:3
$\text{B}_{20}\text{CM}_{23}$	20	2:3
$\text{B}_{20}\text{CM}_{33}$	20	3:3
$\text{B}_{20}\text{CM}_{43}$	20	4:3

2 试验结果及分析

2.1 无侧限抗压强度

图 2(a)、图 2(b)分别为固化剂掺量和固化剂掺和比影响下试样碳化后的无侧限抗压强度强度。由图 2(a)可知,单掺电石渣时,试样碳化后强度 q_u 随电石渣掺量的升高而呈现先升高后降低的现象,且其强度 q_u 均小于 0.5 MPa。出现这一现象的原因可能为:电石渣在碳化作用下生成大量 CaCO_3 沉淀,这些 CaCO_3 会填充土颗粒间的孔隙,一定程度上提高试样密实度,对于试样整体强度增长的贡献较小。但当电石渣掺量过大时,会造成碳化过程中形成的 CaCO_3 堆积而改变原本的土体结构,使其变的松散,在无侧限抗压强度试验中容易产生开裂破坏。

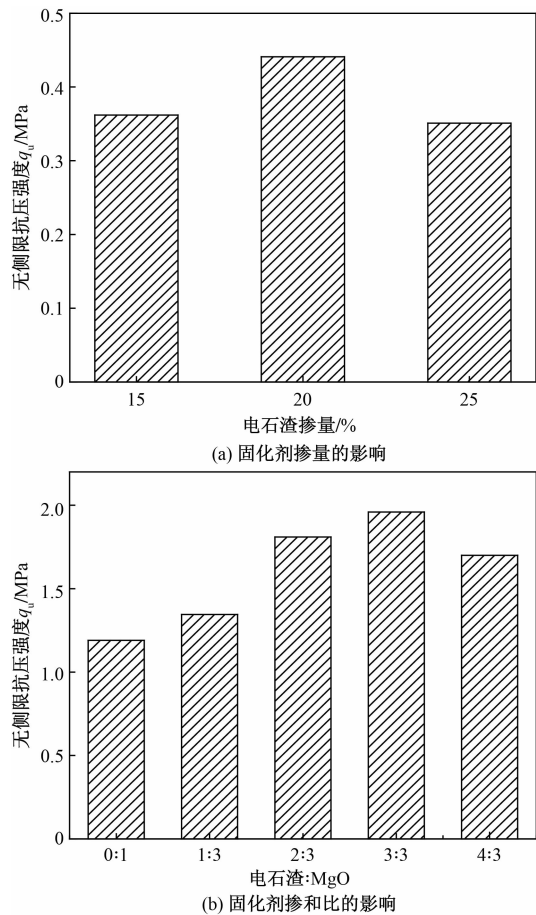


图 2 无侧限抗压强度 (q_u)

由图 2(b)可知,电石渣+活性 MgO 混合掺入时,试样碳化后的强度 q_u 均在 1 MPa 以上,显著高于单掺电石渣时的强度。同时,当固化剂中电石渣:活性 MgO ≤ 1 时,试样的强度 q_u 随固化剂中电石渣含量的增加而升高;当固化剂中电石渣:活性 MgO >1 时,其强度下降,这与试样密度变化的规律一致。其原因为:①活性 MgO 的掺入使得固化剂

在碳化后生成更多具有胶凝性质的产物,如水碳镁石、球碳镁石等,提高了土颗粒间的胶结作用,使试样整体强度提高^[13];②具有高碱性的电石渣为活性 MgO 水化提供了一定碱性环境,使活性 MgO 的水化反应更充分,再通入 CO_2 后生成更多的镁式碳酸盐等胶凝产物;③当固化剂中电石渣含量超过活性 MgO 时,碳化产物中将出现较多的 CaCO_3 沉淀而使土体结构松散,在较大气压冲击下易造成试样在碳化过程中即发生局部开裂破坏,导致强度下降。

2.2 密度

图 3(a)、图 3(b)分别为固化剂掺量和固化剂掺和比影响下试样碳化前后的密度变化。对比图 3(a)、图 3(b)可知,土体碳化后的密度均大于碳化前。其原因可能为:①电石渣中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CO_2 接触后反应生成了大量 CaCO_3 沉淀,使试样质量大幅增加;②活性 MgO 与 CO_2 接触后生成镁式碳酸盐类物质,这一物质除会增加试样质量外,还会填充土体孔隙,使试样体积增加^[15-16];但试样质量的增长率远大于体积增长率,因此造成了碳化后试样的密度增长。

由图 3(a)可知,碳化后试样密度随电石渣掺量

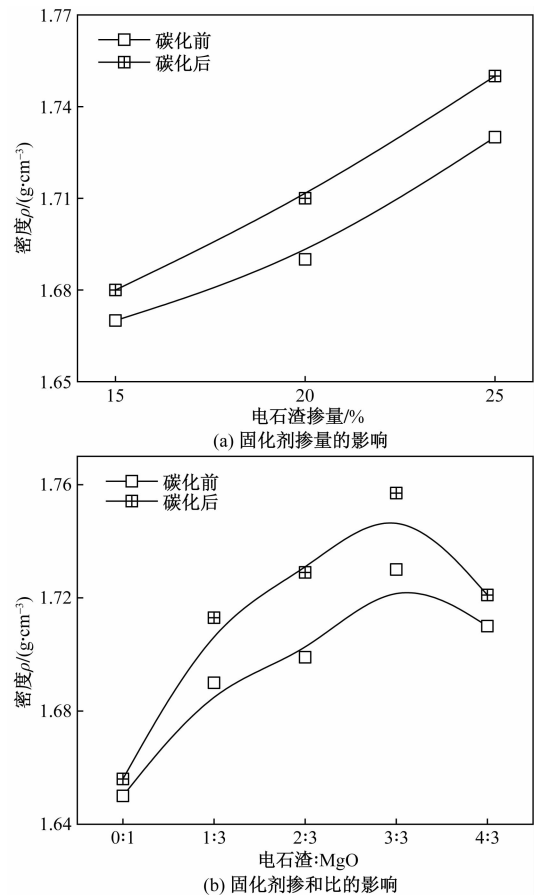


图 3 碳化前后试样密度的变化

的增加而上升;由图 3(b)可知,碳化后试样密度随复合固化剂中电石渣掺量的提升而先增长后降低,试样密度在电石渣:MgO=3:3 时达到峰值。这一现象可解释为:①单掺电石渣时,碳化后的产物以 CaCO₃ 沉淀为主,而 CaCO₃ 沉淀对试样质量变化产生影响,对体积变化的影响较小,因此电石渣掺量越高,试样密度越大;②将电石渣与活性 MgO 混合掺入后;当固化剂中电石渣:活性 MgO≤1 时,碳化后的产物以具有胶结能力的镁式碳酸盐为主,使试样的整体性更好,在通气过程中不易形成开裂;同时,随电石渣占比的增加,试样质量迅速提高,导致试样密度的持续增加。但当固化剂中电石渣:活性 MgO>1 时,碳化产物以 CaCO₃ 沉淀为主,导致试样内部结构松散,在气压冲击下造成试样开裂与体积膨胀,因此试样密度开始减小。

2.3 pH

图 4(a)、图 4(b)分别为固化剂掺量和固化剂掺和比影响下试样孔隙液 pH 的变化。对比图 4(a)、图 4(b)可知碳化后试样的 pH 较碳化前有较大幅度下降,其原因在于:①碳化前电石渣和 MgO 与水接触后发生水解,使试样孔隙液中的 OH⁻ 离子浓度迅速增加导致 pH 升高;②碳化过程中,试样孔隙液

内的 OH⁻ 迅速消耗以生成稳定的水合胶凝产物,导致碳化后试样的 pH 显著降低。

此外,由图 4(a)可知,随着电石渣含量的增加,碳化前后试样的 pH 均呈上升趋势;但由图 5(b)可知,当固化剂掺量一定时,提高电石渣比例将降低试样孔隙液 pH。由于电石渣是一种碱性物质,当其与 MgO 同时存在时,MgO 含量的变化在一定程度上影响了电石渣的水解。当电石渣与 MgO 的比例大于 1 时,影响更为显著。

2.4 粒径分析

图 5、图 6 分别展示了不同变量条件下碳化前后试样的颗粒级配变化。对比图 5、图 6 可知,碳化作用下,土体中粗颗粒(>75 μm)的比例显著增加;碳化过程中,试样内部的胶结团聚现象显著,导致试样整体性增加,使土体强度升高。此外,在固化剂掺量影响下,碳化后土体中粗颗粒的比例随固化剂掺量的增加而降低;且固化剂掺量为 25% 时,土样内部的粗颗粒比例最小,这与其强度最低的结果是一致的。在固化剂掺和比影响下,碳化后试样的粒径分布较碳化前更均匀,但土体内部粗颗粒的比例与电石渣和 MgO 的比例无显著相关性。

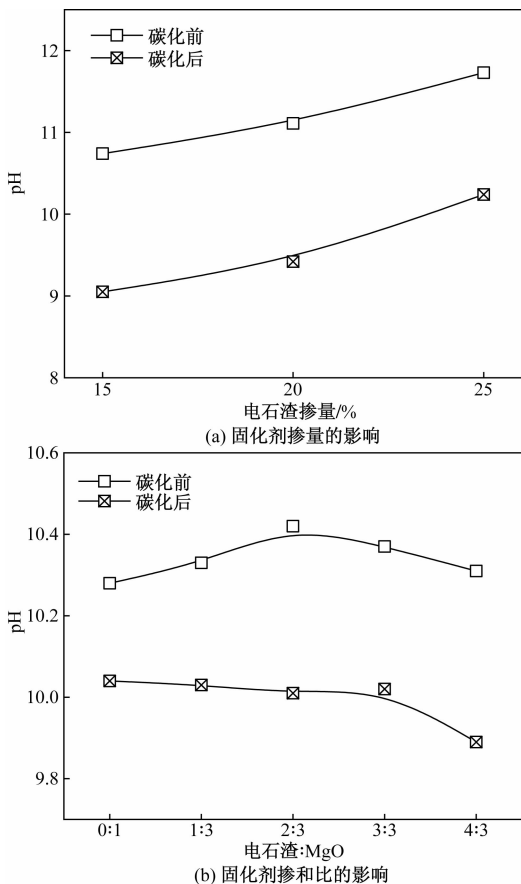


图 4 碳化前后试样 pH 的变化

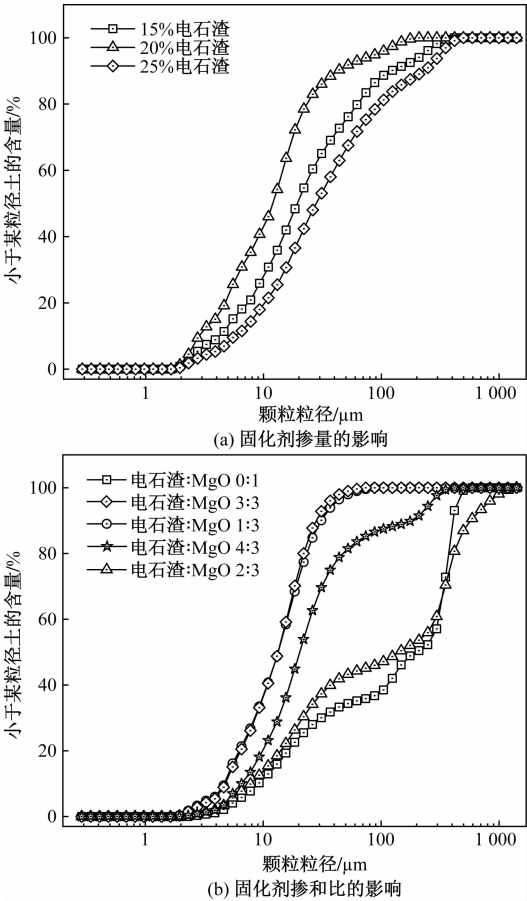


图 5 碳化前试样的颗粒级配

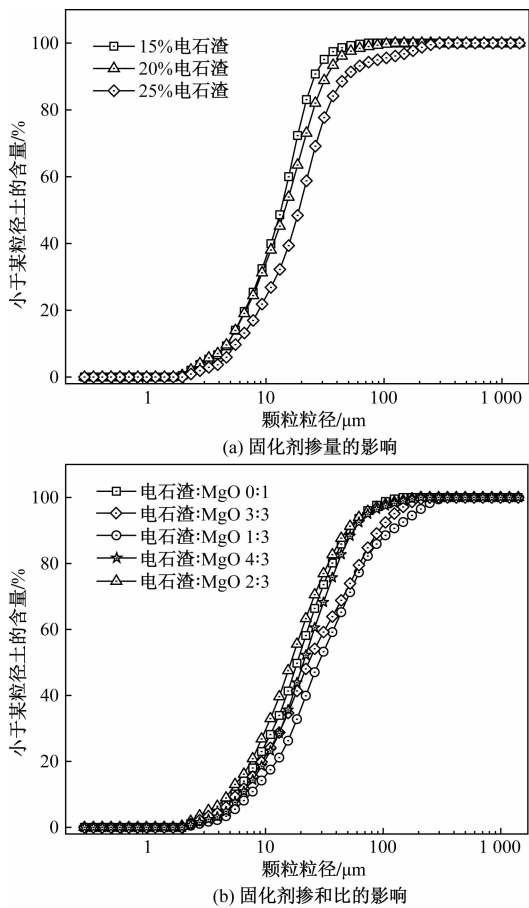


图6 碳化后试样的颗粒级配

3 结论

通过电石渣-活性 MgO 复合固化剂对软土的碳化固化处理,设置了固化剂掺量(单掺电石渣)及固化剂掺和比(电石渣:MgO)两组变量,从物理、力学和化学等方面分析了碳化固化土的工程性质,得出以下主要结论:

- 1)单掺电石渣时,试样碳化后强度在电石渣掺量为 20%处达到峰值;掺入混合固化剂时,试样碳化后强度随电石渣掺入比的升高而呈先上升后下降趋势,并在电石渣:MgO=1:1时获得最高强度。
- 2)试样碳化后密度较碳化前有显著增长;单掺电石渣时,试样碳化后密度随电石渣掺量的增加而增加;掺入混合固化剂时,试样碳化后密度的变化规律与强度一致。
- 3)试样碳化后 pH 较碳化前有显著下降。单掺电石渣时,试样碳化后 pH 随电石渣掺量的增加而增加;掺入混合固化剂时,试样碳化后 pH 在电石渣:MgO=4:3时发生明显减小。
- 4)碳化后试样内部的粗颗粒(>75 μm)比例显

著提高。单掺电石渣时,碳化后试样中粗颗粒的比例随固化剂掺量的增加而降低;但掺入混合固化剂时,试样内部粗颗粒的比例与电石渣和 MgO 的比例无显著相关性。

参考文献

[1] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 1-7.

[2] 何开胜. 水泥土搅拌桩的施工质量问题 and 解决方法[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 778-781.

[3] 曹菁菁. 活性氧化镁碳化固化土微观机理及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.

[4] HOTINEANU A, BOUASKER M, ALDAOOD A, et al. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 119: 151-157.

[5] TREMBLAY H, DUCHESNE J, LOCAT J, et al. Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 535-546.

[6] 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 (Science and Technology), 2015, 22: 1859-1868.

[7] CAI G H, DU Y J, LIU S Y, et al. Physical properties, electrical resistivity, and strength characteristics of carbonated silty soil admixed with reactive magnesia[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52: 1699-1913.

[8] 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.

[9] 顾海荣, 张鹏, 王盛年, 等. 偏高岭土基聚物改良土最优配比及固化效果分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17): 7089-7098.

[10] 尚高鹏, 秦小军, 刘路路. 基于纤维聚合物改良的粉土力学特性与微观结构演化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(26): 11601-11608.

[11] 张莹莹, 王其标. 工业废料电石渣在路基及其他方面综合利用途径综述[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011, 7(1): 34-37.

[12] 储诚富, 王利娜, 李小春, 等. 水泥电石渣固化淤泥-铁尾矿渣的强度试验[J]. 工业建筑, 2015, 45(5): 81-86, 80.

[13] 牛晨亮, 黄新, 李战国, 等. 利用工业废渣固化软土的试验研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(10): 1871-1874.

[14] 栗培龙, 朱德健, 裴仪, 等. 电石渣稳定土强度特性影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2485-2490.

[15] 蔡光华. 活性氧化镁碳化加固软弱土的试验与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.

[16] 蔡光华, 刘松玉, 曹菁菁. 活性氧化镁碳化加固粉土微观机理研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(5): 105-113, 128.

Experimental Study of Carbide Slag-MgO Stabilized Mud under Carbonation Condition

ZHENG Chenhui¹, CAI Guanghua^{2,3}, ZHONG Yuqing², DU Guangyin⁴

(1. Jiangsu Transportation Engineering Construction Bureau, Nanjing 210004, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, China; 4. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Soft soil is a kind of widely-distributed soil with poor engineering properties, and its stabilization using cement does not meet the requirements of modern social development. The composite binder of carbide slag-reactive MgO and CO₂ were used to carbonize and stabilize silty soil, and two variables of the binder dosage (single carbide slag) and the carbide slag-MgO ratio were set. The engineering properties of the carbonated/stabilized soil were analyzed from the physical mechanics and chemistry aspects. The results showed that: ①when the content of only carbide slag was 20%, the soil strength was the highest after carbonation. With the addition of a mixing binder, the strength of the carbonated sample increased first and then decreased with increasing the incorporation ratio of carbide slag. ②The density of the carbonated samples increased significantly compared with that before carbonation. When calcium carbide slag was only added, the density of the carbonated samples increased with the increasing content of carbide slag. With the addition of a mixed binder, the variation in the density of the carbonated samples was consistent with the strength. ③The pH of the carbonated samples decreased significantly compared with that before carbonation. With the addition of carbide slag, the pH increased with the increase of carbide slag content after carbonation. With the addition of a mixing binder, the pH decreased obviously after carbonization when the carbide slag-MgO ratio was 4:3. ④the proportion of coarse particles (>75 μm) in the carbonated samples significantly increases, and it decreased with increasing the content of carbide slag. However, there is no significant correlation between the proportion of coarse particles and the carbide slag-MgO ratio when the mixing binder is added. The results would be beneficial to improving the utilization of solid waste resources and expanding the engineering application of carbide slag-MgO carbonation technology in the treatment of soft soils.

Keywords: carbide slag; reactive MgO; carbonation stabilization; unconfined compressive strength; particle size distribution