

MgO固化 - 碳化盾构离心高液限粉土界限含水率试验研究

李炳志¹, 李彦澄¹, 胡卓凡¹, 殷子鸣¹, 张少凯¹, 闵凡路^{1,2}

¹河海大学土木与交通学院, 江苏 南京

²河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京

收稿日期: 2023年8月21日; 录用日期: 2023年9月14日; 发布日期: 2023年9月25日

摘要

针对泥水盾构产生的工程废弃土可塑性无法满足工程规范要求的问题, 开展活性氧化镁固化 - 碳化高液限粉土的界限含水率试验研究。分析液、塑限及塑性指数变化规律, 探究可塑性变化原因。高液限粉土在掺入氧化镁后, 增大掺量或延长碳化时间均可使固化 - 碳化土的塑限提高, 液限和塑性指数降低, 塑性指数最低为7。可塑性不断降低的原因可能有两种: 一是由于氧化镁掺入后产生的水化产物与细粒颗粒胶凝团聚, 使细粒含量降低, 土体吸水能力减弱, 导致土体液限降低; 二是由于氧化镁颗粒的掺入及反应使级配更加合理, 水分对土体结构的影响降低, 导致塑限升高。 w_L 和 w_p 的变化共同导致塑性指数的降低。

关键词

泥水盾构, 高液限粉土, 碳化, 界限含水率

Experimental Study on the Limit Water Content of MgO Modified Carbonized Shield Tunnel Centrifugal High Liquid Limit Silt

Bingzhi Li¹, Yancheng Li¹, Zhuofan Hu¹, Ziming Yin¹, Shaokai Zhang¹, Fanlu Min^{1,2}

¹College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu

²Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Ministry of Education, Nanjing Jiangsu

Received: Aug. 21st, 2023; accepted: Sep. 14th, 2023; published: Sep. 25th, 2023

Abstract

In response to the problem that the plasticity of engineering waste soil generated by slurry shield

文章引用: 李炳志, 李彦澄, 胡卓凡, 殷子鸣, 张少凯, 闵凡路. MgO 固化-碳化盾构离心高液限粉土界限含水率试验研究[J]. 交通技术, 2023, 12(5): 431-437. DOI: 10.12677/ojtt.2023.125047

tunneling cannot meet the requirements of engineering specifications, an experimental study on the limit water content of activated magnesium oxide modified carbonized high liquid limit silt was conducted. Analyze the change rule of liquid and plastic limit and plasticity index, and investigate the reason of plasticity change. It is found that after the high liquid limit silt is mixed with magnesium oxide, increasing the amount of MgO or prolonging the carbonization time can make the plastic limit of the modified-carbonated soil increase, the liquid limit and plasticity index decrease, and the plasticity index is as low as 7. The reason for the plasticity decreasing may be two kinds: firstly, due to the hydration products produced after the magnesium oxide mixing with the fine particles gelling agglomeration, so that the fine particles content decreases, and the soil body's ability of absorbing water is weakened, which results in the decrease of the liquid limit of the soil; and secondly, because the magnesium oxide particles are not mixed with the liquid limit of the soil, it is the reason for the decrease of the liquid limit. Due to the magnesium oxide particles and reaction to make the grading more reasonable, the influence of water on the soil structure is reduced, resulting in higher plastic limit. The changes in w_L and w_p together lead to a decrease in the plasticity index.

Keywords

Slurry Shield, High Liquid Limit Silt, Carbonation, Limit Water Content

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

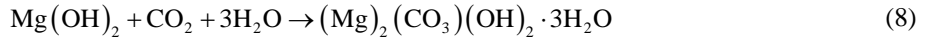
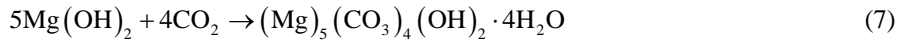
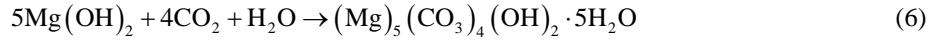
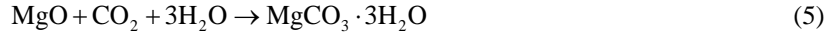
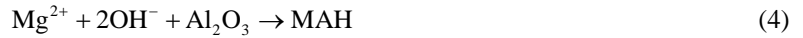
泥水盾构工法以其安全、高效等优势在越来越多的水下隧道工程建设中被广泛应用[1] [2] [3], 甚至在一些全断面黏土地层中也开始使用, 如济南济泺路穿黄隧道工程[4]、扬州瘦西湖隧道[5]等。然而其水力出土的方式, 使得在掘进过程会产生大量的废弃泥浆。即使经过一系列的脱水减量处理, 依然会产生大量的废弃黏土。以济南济泺路穿黄隧道工程为例, 工程采用双台泥水盾构同向穿越全断面粉质黏土地层, 产生了共约 1233 万方[4]的含水率约 280%的废弃泥浆, 经过筛分、旋流、离心及板框处理后, 单台盾构约产生 210 万方泥饼。

这些土因无法满足相关规范[6] [7]中物理指标的要求(如塑性指数、无侧限强度等)而无法直接利用。如不及时进行处理, 不仅会影响工期, 还可能因处理不当而导致环境污染。目前, 化学固化方法经常被用于处理工程废弃土, 常见的化学固化剂通常包括生石灰、水泥等无机固化材料。而这些固化剂耗能较高, 需要一种更加高效、环保的固化材料或固化方法进行废弃土处理。对于泥水盾构产生的废弃土, 其在改性处理后性质的变化规律, 也是值得关注的。

已有学者针对固化材料方面研究[8]发现相较于生石灰、水泥等材料, 氧化镁被认为是一种绿色可持续、富有前景的固化剂, 具有低碳环保、强度增长潜力大等优势。另有学者通过研究加速碳化技术[9], 发现可以提高碳化废弃土的含碳量和稳定性, 减少碳排放及对环境的污染, 并可用于多个再利用领域。为了改善泥水盾构废弃土的性质并提高其资源化利用的可行性, 如何控制碳化条件, 以保证在泥水盾构废弃土固化 - 碳化获得较好效果的同时, 能够吸收更多的 CO_2 , 达到节能固碳的目的, 是日前研究的重点。

关于氧化镁固化 - 碳化废弃土的改性机理[10]-[15], 目前一般认为包括水化反应(式 1、2)、火山灰反应(式 3、4)和碳化反应(式 5~8)。





本研究采用江阴靖江长江隧道工程的泥水盾构离心高液限粉土,通过界限含水率试验,对固化-碳化废弃土进行研究。通过改变养护条件和碳化条件 t ,分析泥水盾构废弃土碳化后可塑性,探究塑限 w_p 、液限 w_L 、塑性指数 I_p 的变化规律,为日后城市地下隧道建设过程中盾构废弃土的合理处理和利用提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

试验所用废弃土取自江苏省江阴靖江长江隧道,来源于泥水盾构穿越粉质黏土地层时产生的泥浆。离心脱水后产生的废弃土的塑限和液限分别为 55.1% 和 70.4%,塑性指数为 15,呈明显软塑状且无法击实。为保证研究效果避免废弃土风化失水,待泥浆离心后立刻取样。废弃土的基本物理性质指标见表 1。该废弃土细粒含量为 80.3%,砂粒含量为 16.6%,根据《土的工程分类标准》[16],属于粉土中的高液限粉土(MH) ($w_L \geq 50\%$)。

Table 1. Basic properties of waste soil

表 1. 废弃土基本性质

含水率 (%)	密度 (g/cm^3)	比重	粒径 (%)			塑限 (%)	液限 (%)	塑性指数
			<0.005 mm	(0.005~0.075) mm	(0.075~2) mm			
56.01	1.41	2.61	3.1	80.3	16.6	55.1	70.4	15

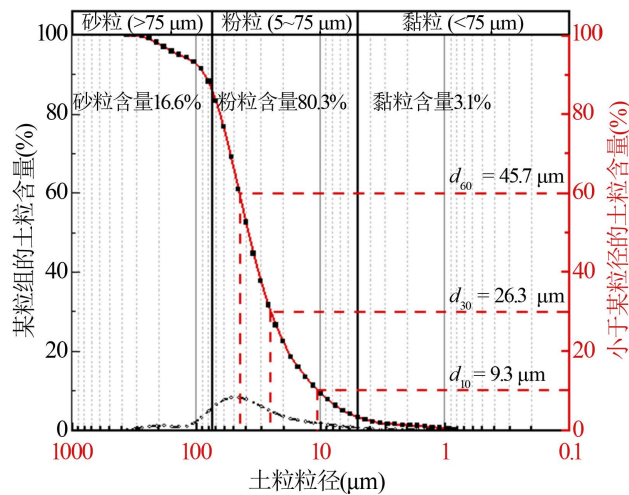


Figure 1. Particle analysis graph

图 1. 颗粒分析曲线图

颗粒分析试验采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行测定。放入少量土样于烧杯中, 加入大量纯水并用玻璃棒进行搅拌、稀释。用样品注射器吸入少量稀释混合液, 注入超声波测量专用烧杯中进行测量。颗粒粒径测量结果如图 1 所示, 测试得到有效粒径 d_{10} (9.3 μm)、中值粒径 d_{30} (26.3 μm)、限制粒径 d_{60} (45.7 μm)。

根据下式 9、10 可以计算得出不均匀系数 C_u 为 4.91; 曲率系数 C_c 为 1.63。根据《土的工程分类标准》[16], 该土级配不良。

$$C_u = d_{60}/d_{10} \quad (9)$$

$$C_c = (d_{30})^2 / (d_{10} \times d_{60}) \quad (10)$$

式中, C_u ——不均匀系数; C_c ——曲率系数, 1~3 时级配连续, 当 $C_u \geq 5$, $1 \leq C_c \leq 3$, 且细粒含量不超过 5% 时级配良好, 反之则不良[16]; d_{10} ——有效粒径, 单位: μm ; d_{30} ——中值粒径, 单位: μm ; d_{60} ——限制粒径, 单位: μm 。

试验所使用的固化剂 MgO 产自辽宁海城, 颜色为淡黄色, 外形呈极细状粉末。利用 X 射线荧光光谱全元素、半定量检测 MgO 的主要成分含量如表 2, 根据规范 YB/T4019-2006 [17], 通过柠檬酸中和法测定其活性 ACC 值为 75 s。

Table 2. The main chemical composition content of MgO

表 2. MgO 主要化学成分含量

成分	MgO	SiO ₂	IL	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
含量(%)	87.43	4.92	4.32	2.18	0.67	0.47

2.2. 试验方法

试验共设计了 3 种不同的氧化镁掺量, 即 $a_m = 3\%$ 、 9% 、 15% 。氧化镁掺量 a_m (the amount of magnesium oxide) 定义为氧化镁质量与干土质量之比。按照设计比例将氧化镁加入至废弃土中, 利用机械搅拌机以 100 rot/min 的转速搅拌 5 分钟, 而后静置至室温。将试样用塑料薄膜包裹密封, 置于养护箱中养护, 养护条件为温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、湿度 $> 90\%$ 。

在试样达到表 3 要求的对应龄期后取出, 按照试验方案计划的碳化时间 t 进行碳化。在碳化桶内装好试样后, 拧紧法兰盘螺母, 关闭排气阀, 设定 50 kPa 通气压力后缓慢打开加压气瓶阀门, 检查碳化桶气密性; 确保无漏气和异响后, 打开排气阀排气 1 分钟, 将碳化桶内的空气排尽; 关闭排气阀, 将调压阀设定为 200 kPa 碳化压力进行加速碳化试验。碳化完成后, 测定碳化试样的界限含水率。

Table 3. Test program

表 3. 试验方案

试验名称	MgO 掺量	养护龄期(天)	碳化时间(小时)
界限含水率	3%、9%、15%	7	0、1、4、8

试验按照《土工试验方法标准》第 9.2 条, 利用 GYS-2 型液塑限联合测定仪, 测定试样的液塑限。根据式 11 计算塑性指数 I_p :

$$I_p = w_L - w_p \quad (11)$$

2.3. 碳化装置设计

空气中的 CO_2 浓度仅占 0.03%，在自然条件下发生的碳化反应不充分，且缓慢的碳化过程会使试样表面形成一层碳化硬壳，阻碍反应进一步发生。因此，为研究氧化镁在高纯度 CO_2 加速碳化条件下的碳化效果，采用南京土壤仪器厂加工制造的加速碳化加固装置。器材如图 2 所示。试验选用工业法生产的 CO_2 气体，纯度达 99.5%。碳化装置由 CO_2 加压气瓶、计时装置和碳化桶三部分组成。碳化桶材质为有机玻璃，内部直径 140 mm，高 260 mm。每层最多可放入 6 个试样，最多放三层，并且桶内设有多孔管保证每个试样。上部进气口通过塑料软管连通二氧化碳加压气瓶，下部排气阀用于卸压；碳化压力依靠压力表及调压阀控制，气瓶内充满 99.5% 高纯液化 CO_2 ，始终将碳化压力维持在设定压力，减压阀最高可保证 0.5 Mpa 的碳化压力。高纯液化 CO_2 ，始终将碳化压力维持在设定压力，减压阀最高可保证 0.5 Mpa 的碳化压力。



Figure 2. Carbonized reinforcement test device (unit: mm)

图 2. 碳化加固试验装置(单位: mm)

3. 结果

各 a_m 下界限含水率、塑性指数的变化如图 3、图 4 所示。随着 t 的延长，各 a_m 下的 w_p 基本呈现上升趋势，最大为 60.4%，与废弃土相比提升了 5.3%；液限 w_L 和 I_p 也逐渐下降， w_L 最小为 67.2%，降低了 3.2%； I_p 最低为 7，降低了 53.5%，且均低于废弃土。在 $t < 4$ h 时，各 a_m 下的 w_p 快速升高、 w_L 和 I_p 快速下降，4 h 后 w_p 、 w_L 和 I_p 均趋于稳定。碳化前 4 h 界限含水率的快速变化表明碳化反应剧烈进行，水化产物快速消耗生成碳化产物，胶结能力增强使土粒团聚能力提高，进一步消耗孔隙水转化为碳化产物中的结晶水，提高了水稳定性，水分对土体结构影响减小，导致 w_p 升高； $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 通过碳化反应转化为镁式碳酸盐产物，胶结团聚能力增强，使细粒团聚为更大的土颗粒，比表面积减小，土体吸水能力减弱， w_L 降低。

根据图 3、图 4 中 w_p 、 w_L 和 I_p 的变化规律可以看出，在掺入氧化镁后， w_p 上升， w_L 和 I_p 下降。 w_p 的升高表明掺入氧化镁后，生成的 MSH 凝胶态水化产物和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 结晶态水化产物将土体内的孔隙水分别转化为势能更高的结合水和矿物水[18]，水分对土体结构的影响降低。 w_L 的降低表明了土壤可塑态上限含水率持续下降，即土体对水分的吸收能力降低。 I_p 随 a_m 的增加而持续下降，表明土体可塑性不断降低，主要有两种原因：一是由于掺入氧化镁后随着水化反应的进行， $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 水化产物与细粒颗粒胶凝团聚，使细粒含量降低，土体吸水能力减弱，导致土体 w_L 降低；二是由于氧化镁掺入土体后使土体结构更稳定，土体骨架更为合理，水分对土体结构的影响降低，导致 w_p 升高。

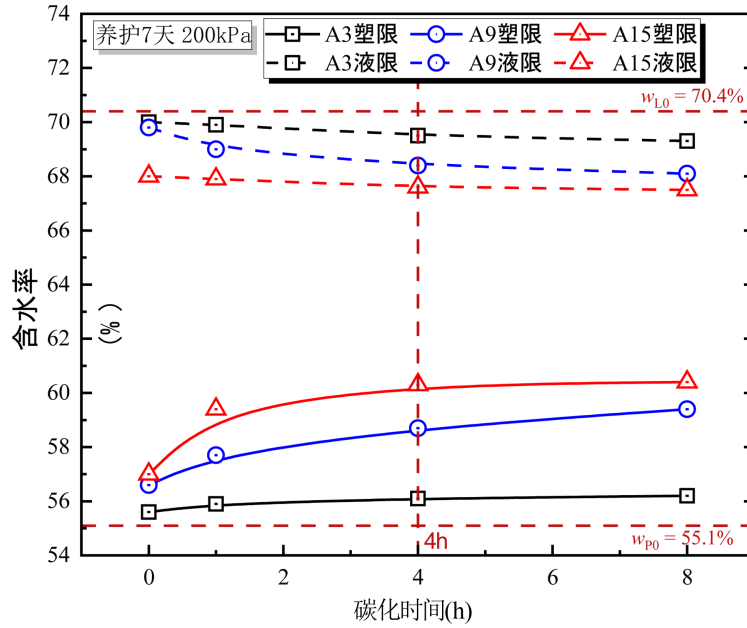


Figure 3. The change of liquid-plastic limit of magnesium oxide modified carbonated soil with different carbonization time

图 3. 不同碳化时间氧化镁固化 - 碳化土液塑限变化图

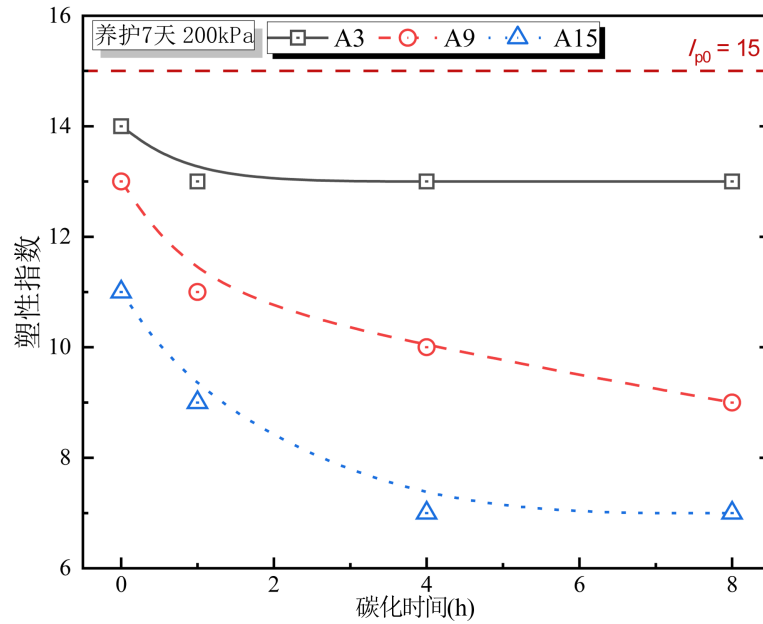


Figure 4. The plasticity index variation of magnesium oxide modified carbonated soil with different carbonization time

图 4. 不同碳化时间氧化镁固化 - 碳化土塑性指数变化图

根据《公路路面基层施工技术细则》[6]要求, 土壤 $I_p < 26$, 而本文中废弃土以及所有 a_m 、 t 条件下的固化 - 碳化土均满足要求。

4. 结论

- 1) 针对江阴靖江长江隧道泥水盾构离心脱水后的高液限粉土, 在掺入氧化镁并固化 - 碳化后, 通过

增大 a_m 、延长 t 可使 w_p 提高, w_L 和 I_p 降低; w_p 升高了 0.5%~5.3%, w_L 降低了 0.4%~2.9%, I_p 降低了 6.7%~53.3%, 最低为 7。

2) 所有固化、碳化条件下的固化 - 碳化土均满足《公路路面基层施工技术细则》规范中 $I_p < 26$ 的要求。

3) 氧化镁固化 - 碳化高液限粉土可塑性不断降低, 有两种原因: 一是由于 $Mg(OH)_2$ 水化产物与细颗粒胶凝团聚, 使细粒含量降低, 土体吸水能力减弱, 导致土体 w_L 降低; 二是由于氧化镁颗粒的掺入及反应使土体粒径级配更加合理, 土体骨架更稳定, 水分对土体结构的影响降低, 导致 w_p 升高。 w_L 和 w_p 的变化共同导致塑性指数的降低。

基金项目

本文作者感谢国家自然科学基金(No.52078189)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(B230201037)对研究的支持。

参考文献

- [1] Alberto-Hernandez, Y., Kang, C., Yi, Y. and Bayat, A. (2018) Clogging Potential of Tunnel Boring Machine (TBM): A Review. *International Journal of Geotechnical Engineering*, **12**, 316-323. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1277621>
- [2] Lu, Y., Ma, J.-M., Xu, Q.-J. and Han, M.-N. (2004) TBM in the Future of China. *Marine Georesources & Geotechnology*, **22**, 185-193. <https://doi.org/10.1080/10641190490467116>
- [3] Pirastehfar, K., Shivaiei, S., Sadaghiani, M.H. and Nikooee, E. (2022) 3D Numerical Investigation of the Effects of Driving of the New Mechanized Tunnel on Existing Segmental Linings and Ground Surface Settlements—A Case Study: Shiraz Metro Line 2. *International Journal of Geotechnical Engineering*, **16**, 878-889. <https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1816381>
- [4] Wang, D., Min, F., Lyu, H., et al. (2023) Recycling Waste Sand from Slurry Shield Tunneling: A Sustainable Filter Aid for Waste Slurry Dehydration. *Journal of Cleaner Production*, **383**, Article ID: 135387. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135387>
- [5] 吴昌胜, 朱志铎. 不同直径盾构隧道地层损失率的对比研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2257-2265.
- [6] 交通运输部公路科学研究院. JTG/T F20-2015 公路路面基层施工技术细则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [7] 中国建筑科学研究院, 机械工业勘察设计研究院. JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 257 p.
- [8] Harrison, J. (2003) New Cements Based on the Addition of Reactive Magnesia to Portland Cement with or without added Pozzolan. *Proceedings of the CIA Conference: Concrete in the Third Millenium*, Brisbane, 5 February 2003, 24-35.
- [9] 蔡光华, 刘松玉, 曹菁菁, 王亮. 二氧化碳碳化技术研究进展[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2017, 15(1): 1-11.
- [10] Amaral, L.F., Oliveira, I.R., Bonadia, P., R. Salomão, R. and Pandolfelli, V.C. (2011) Chelants to Inhibit Magnesia (MgO) Hydration. *Ceramics International*, **37**, 1537-1542. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.01.030>
- [11] Botha, A. and Strydom, C.A. (2001) Preparation of a Magnesium Hydroxy Carbonate from Magnesium Hydroxide. *Hydrometallurgy*, **62**, 175-183. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(01\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(01)00197-9)
- [12] Temuujin, J., Okada, K. and Mackenzie, K.J.D. (1998) Role of Water in the Mechanochemical Reactions of MgO-SiO₂ Systems. *Journal of Solid State Chemistry*, **138**, 169-177. <https://doi.org/10.1006/jssc.1998.7768>
- [13] 蔡光华. 活性氧化镁碳化加固软弱土的试验与应用研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [14] 李兆恒. MgO-SiO₂-H₂O 胶凝体系的反应机制及应用研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [15] 袁润章. 胶凝材料学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 1996.
- [16] 南京水利科学研究院. GB/T 50145-2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007: 38.
- [17] 中钢集团洛阳耐火材料研究院. 轻烧氧化镁化学活性测定方法[Z]. 洛阳: 中钢集团洛阳耐火材料研究院, 2006: 1-4.
- [18] 马佳伟. 石灰改性脱水废弃黏土水分转化规律及碳化加固试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2022.