

DOI: 10.11779/CJGE201602013

活性 MgO 碳化固化土的干湿循环特性试验研究

郑 旭, 刘松玉, 蔡光华, 曹菁菁

(东南大学岩土工程研究所, 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 碳化固化技术是一种利用二氧化碳对搅拌有活性氧化镁的土体进行碳化, 以达到快速提高强度的低碳搅拌处理软土的创新技术。通过室内试验研究干湿循环对碳化固化土物理力学特性的影响, 并与相同掺量下水泥固化土进行对比。结果表明: 活性 MgO 固化粉土碳化 3 h 试样的无侧限抗压强度可达 5 MPa, 粉质黏土碳化 24 h 试样可达 2.6 MPa; 干湿循环后碳化固化土的干密度降低, 而水泥土干密度基本不变; 6 次干湿循环后粉土碳化试样的无侧限抗压强度仍然能达到 4 MPa 以上, 为水泥固化粉土强度的 2 倍, 具有较好的抗干湿循环性能; 经过 6 次干湿循环后, 粉质黏土碳化试样的残余强度仅为 35%, 而水泥固化粉质黏土降到 65%, 表明固化粉质黏土的抗干湿循环性能均较差, 且粉质黏土碳化试样的抗干湿循环能力不及水泥固化粉质黏土试样。通过 X 射线衍射 (XRD)、电镜扫描 (SEM) 及压汞试验 (MIP) 测试表明干湿循环对粉土碳化试样的累计孔隙影响不大, 因此粉土试样仍然具有比较大的密实度来保证试样强度; 粉质黏土碳化试样因孔隙增加明显而变得疏松, 因此强度显著降低。

关键词: 土体固化; 碳化; 干湿循环; 水泥土

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)02-0297-08

作者简介: 郑 旭 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事特殊地基处理方面的研究。E-mail: zx1989@seu.edu.cn。

Experimental study on drying-wetting properties of carbonated reactive MgO-stabilized soils

ZHENG Xu, LIU Song-yu, CAI Guang-hua, CAO Jing-jing

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Nanjing 210096, China)

Abstract: The carbonated curing technology is an innovative ground improvement method, in which the reactive magnesia (MgO) is firstly mixed with the soft soils and then carbon dioxide is injected for carbonation in short time. Laboratory tests are performed to investigate the physical and mechanical properties of carbonated reactive MgO -stabilized soils under drying-wetting cycles. The test results are compared with those of cemented soils. It is shown that the maximum unconfined compressive strength of MgO -stabilized silts can reach 5 MPa after 3 hours carbonation, and that of MgO -stabilized silty clay can only reach 2.6 MPa after 24 hours carbonation. The dry density of carbonated MgO -stabilized soils decreases after drying-wetting cycles, while that of cemented soils has significant variation. Silt samples have better performance after drying-wetting cycles, and the maximum unconfined compressive strength of carbonated silt samples is still able to reach 4 MPa after 6 drying-wetting cycles which is twice that of cemented silts. However, the residual compressive strength of the carbonated silty clay is only 35% after 6 cycles, and it is consistently about 65% for the cemented silty clay, therefore the resistance to drying-wetting cyclic performance is worse than that of silt samples, and the resistance to drying-wetting cyclic performance of carbonated silty clay is worse than cemented silty clay. XRD, SEM and MIP tests reveal that the cumulative volume of pore void of carbonated silt is essentially constant. Thus the carbonated silt samples can still show relatively high strength in the unconfined compressive tests. Whereas, the void ratio of carbonated silty clay increases after cyclic drying-wetting tests and further reduces the density, which is responsible for the significant strength reduction.

Key words: soil stabilization; carbonation; drying-wetting cycle; cemented soil

0 引言

目前软土加固领域主要采用波特兰水泥 (硅酸盐水泥) 作为固化剂^[1], 但是使用水泥作为固化剂存在

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51279032); 国家科技支撑项目 (2012BAJ01B02-01); 中央高校基本科研业务费专项资金项目; 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目 (KYLX_0147)
收稿日期: 2014-12-26

高能耗、高CO₂排放、不可再生资源消耗大、环境污染严重和固化速率较慢等显著缺点^[2-6]，研究能够替代水泥的低碳环保新型固化剂则具有重要的意义。

2010年，东南大学与英国剑桥大学首次将基于活性MgO-CO₂的碳化固化技术应用于土体加固领域^[7-9]，提出了碳化搅拌桩的理念，并申请了相关专利^[10-11]。该技术的基本原理是以活性氧化镁作为土体固化剂，将土体与活性氧化镁充分搅拌混合后，然后施加一定压力的CO₂气体对搅拌土进行碳化，通过MgO-H₂O-CO₂之间的快速反应达到快速降低土体含水量、减小土体孔隙率和提高土体强度的目的，同时吸收大量二氧化碳气体将其固化在土体中，以消耗氧化镁煅烧生产过程释放的二氧化碳。

2011年，东南大学岩土工程研究所研制了碳化固化的相关室内试验设备，采用国内常用的建材活性氧化镁，以徐州粉土作为加固对象，对碳化搅拌桩技术进行了初步试验研究，结果表明氧化镁固化土能在3 h内完成主要强度增长，其强度则为相同配比28 d普通硅酸盐水泥（32.5级）固化土的2~3倍，二氧化碳吸收量则可高达理论值90%。综合来看，碳化搅拌桩可以比波特兰水泥搅拌桩减少约90%的工期，65%的生产能耗，77%的CO₂排放^[12]。

李晨^[13]通过无侧限抗压强度、碳化度、pH值、渗透性测试等室内试验，从碳化前后试样体积、质量、密度、强度等几个方面对氧化镁活性、掺量、土体性质对碳化固化效果影响进行了研究，并在强度、pH、渗透性方面与水泥固化土进行了对比，试验结果表明粉土碳化试样仅碳化2 h即可达到最高强度，武汉粉质黏土试样碳化24 h达到最高强度。

还有学者对MgO碳化固化土的耐久性能进行研究，如在干湿循环条件下的耐久性能。干湿循环是一种加速试验，可以用来评价固化土抵抗由于水分变化而对其力学性能造成不利影响的能力。本文对氧化镁碳化固化土和相同配比的水泥土进行了干湿循环对比试验和宏观力学分析，并通过X射线衍射（XRD）、电镜扫描（SEM）和压汞（MIP）对碳化试样的微观变化进行研究，为评价碳化固化土的干湿耐久性提供理论依据。

1 试验方案和方法

1.1 试验材料

试验采用江苏徐明高速公路徐州段工地的粉土和武汉地区淤泥质粉质黏土，颗粒级配曲线如图1所示，主要物理指标如表1所示；活性MgO购自邢台市镁神化工有限公司生产的轻质MgO，水泥使用南京产“海螺牌”32.5普通硅酸盐水泥；试验材料的主要化学成分如表2所示。

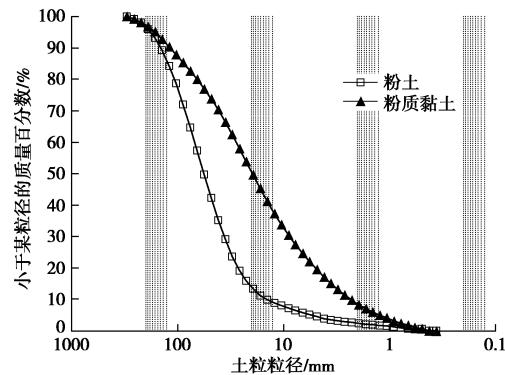


图1 试验土样的颗粒分析结果

Fig. 1 Grain-size distribution curves of soils

表1 两种土的主要物理指标

Table 1 Basic characteristics of soils

土类	土粒比重	液限 w _L /%	塑限 w _P /%	塑性 指数
粉土	2.70	33.8	23.9	9.9
粉质黏土	2.75	37.2	22.5	14.7

表2 试验材料的化学成分分析结果

Table 2 Chemical composition of test materials (%)

成分	粉土	粉质黏土	MgO	水泥
SiO ₂	71.80	62.20	3.91	27.40
Al ₂ O ₃	10.20	17.60	0.30	11.50
Fe ₂ O ₃	3.57	5.91	0.30	3.43
CaO	6.41	4.40	1.26	48.80
K ₂ O	2.16	3.12	—	1.31
MgO	1.22	2.60	91.80	1.16
TiO ₂	0.65	1.04	—	0.48
Na ₂ O	3.10	0.48	0.02	0.14
P ₂ O ₅	0.51	0.21	0.31	0.13
SO ₃	0.27	0.13	0.40	3.28

1.2 制样方法

试样均采用静压法进行制备。为了保证平行试样的均匀性，控制试样干密度与天然土体干密度相近，粉土试样为1.375 g/cm³，粉质黏土试样为1.40 g/cm³。为了能够顺利制样并成功脱模，选定试样初始土体含水率为25%，氧化镁干粉掺量为15%。

由于不同土性试样的渗透性不同，试样完全碳化所需的时间存在差异，粉土试样和粉质黏土试样分别通气3 h和24 h保证试样达到最高强度。同时采用静压法制备水泥固化土对比样，控制干密度为1.375 g/cm³和1.40 g/cm³，25%初始土体含水率，水泥掺量也为15%。

实验前先将土晾晒、粉碎后过2 mm筛，再将过筛后的土烘干。在实验室调配出初始含水率为25%的拟加固土。拟加固土调配完毕后，将其放入搅拌机，在机械搅拌的同时向土中缓慢均匀地加入预先秤量好的氧化镁。待混合物搅拌均匀后采用静压法进行制样。

静压法制样过程如下：①称取一个试样需要的混合土，分3次将土填入模具中并分层人工压实。②当最后1/3的土样装入模具后，用油压千斤顶进行压实，至所有土样被均匀压实。③压实后将辅助模具卸下使

用脱模器进行脱模出样。

本次试验中静压法制成为直径50 mm,高100 mm的圆柱形试样。试样制后,测量其直径、长度和质量,然后立即装入碳化装置进行通气碳化。

1.3 碳化方法

试样采用三轴碳化装置进行通气碳化,三轴碳化室具体构造见图2。通气装置由TSS-2型柔性壁三轴渗透仪改装,将其渗透压力管与二氧化碳气瓶相连接,二氧化碳出气阀采用压力控制式气阀以控制二氧化碳通气压力。改装后的通气装置如图3所示。碳化过程中控制CO₂气体压力为200 kPa,围压为300 kPa。粉土试样通气3 h,粉质黏土试样通气24 h后取出试样,完成碳化试样的制备。

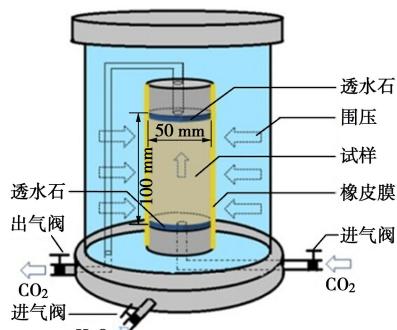


Fig. 2 Schematic diagram of carbonation
Fig. 2 Schematic diagram of carbonation



Fig. 3 CO₂ providing device

1.4 干湿循环试验方法及测试内容

将碳化完成的试样放入养护室(温度20±2℃,相对湿度≥95%)中养护1 d后进行干湿循环试验。水泥土试样制好后直接放入养护室中进行养护,28 d后进行干湿循环试验。干湿循环试验参考(ASTM)D4843-88^[14]、Estabragh等^[15]、Ahmed等^[16]的研究成果进行改进和简化。采用低温烘箱和养护室进行环境模拟。

为消除高温对试样的影响,控制烘箱温度为30℃,进行6级循环,每级循环3个平行样。试验步骤为:

(1)干湿循环开始前对试样编号,称重,量尺寸。先取出一组测试其无侧限抗压强度作为开始的基准值。再取出一组特别标注为质量变化测试样,测试其在循环开始前的质量,然后与剩下的5组一起开始干湿循环,另6组继续进行标准养护。

(2)将试样置于温度为30℃的烘箱中烘48 h。

然后取出,对之前标注好的质量变化测试样进行拍照和质量测试。将试样在常温下放置1 h后放入培养箱中,往培养箱中缓缓加入20℃蒸馏水直至试样被淹没,将培养箱放在20℃养护室中23 h。之后取出试样,对之前标注的质量变化测试样进行拍照和质量测试,此为完成一次干湿循环。

(3)湿循环结束后,取出一组试样(非质量变化测试样)测试尺寸、质量和无侧限抗压强度。同时取出一组标准养护试样同样测试其尺寸、质量和无侧限抗压强度。无侧限抗压强度试验设备采用南京宁曦土壤有限公司2009年6月出厂的YSH-2型石灰土无侧限压力仪,压力传感器系数为21 N/0.01mm,试样承台上上升速率为1 mm/min。

(4)重复(2)和(3),直到6次干湿循环结束,质量变化测试样作为第6次循环测试样,最后进行无侧限抗压强度测试。

各个条件的试样编号如表3所示。

表3 试样编号

Table 3 Number of samples

土类	固化条件	编号
粉土	+活性MgO碳化3 h后标准养护1 d	FM
	+水泥标准养护28 d	FP
粉质 黏土	+活性MgO碳化24 h后标准养护1 d	NM
	+水泥标准养护28 d	NP

注: F代表粉土; N代表粉质黏土; M代表碳化试样; P代表水泥试样。

每次干湿循环结束,分别对碳化试样和相同配比水泥土试样的无侧限抗压强度进行测试,并同标准养护条件下同龄期试样的无侧限抗压强度进行对比。由于1次干湿循环为3 d,碳化试样干湿循环前标准养护了1 d,所以碳化试样每次干湿循环对应的标准养护龄期分别为4 d(1次),7 d(2次),10 d(3次)…19 d(6次)。

2 试验结果

2.1 试样外观、含水率、密度等变化

图4,5分别是碳化试样和水泥土试样在不同干湿循环次数后的试样照片。

从图4中可以发现粉土试样表面从第四级循环开始出现轻微的脱皮和孔洞,到第六级循环结束试样的脱皮现象已经较为明显。粉质黏土碳化试样在表面上并没有产生裂纹及试样表面脱皮的情况,但发现试样随着干湿循环的进行,表面由开始的比较光滑而逐渐变得粗糙,并产生细小的孔洞,到第3级循环结束孔洞现象尤其明显。粉质黏土碳化试样在每次干循环结束开始湿循环时,可以很明显的看到在蒸馏水中试样表面有粉末掉落的现象。

表 4 各干湿循环次数下试样的平均含水率、密度和干密度

Table 4 Average moisture contents, densities and dry densities of samples under drying-wetting cycles

试样	平均含水率/%				平均密度/(g·cm ⁻³)				平均干密度/(g·cm ⁻³)			
	DW=0	DW=2	DW=4	DW=6	DW=0	DW=2	DW=4	DW=6	DW=0	DW=2	DW=4	DW=6
FM	14.30	19.52	19.56	19.63	1.99	2.04	2.05	2.04	1.74	1.71	1.71	1.70
FP	18.50	21.14	21.84	22.19	1.86	1.90	1.90	1.89	1.57	1.57	1.56	1.56
NM	14.89	30.06	30.24	30.08	1.81	1.95	1.96	1.96	1.57	1.50	1.50	1.51
NP	21.07	22.64	22.52	22.65	1.92	1.99	1.98	1.98	1.59	1.62	1.62	1.61

对比图 5 相同配比的水泥土试样, 水泥土试样表面并没有出现明显的变化。

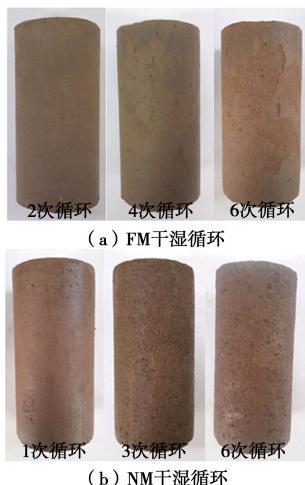


图 4 碳化试样随干湿循环外观变化

Fig. 4 Photos of variation of carbonated soil samples after drying-wetting cycles

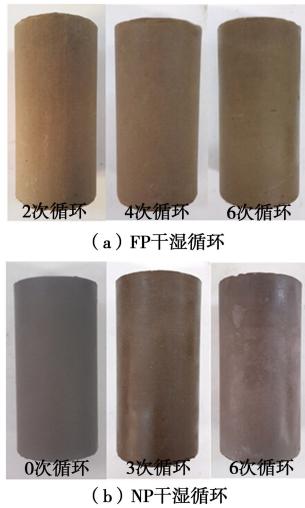


图 5 水泥土试样随干湿循环外观变化

Fig. 5 Photos of variation of cemented soil samples after drying-wetting cycles

表 4 列出了试样在各个干湿循环结束时的平均含水率、密度和干密度变化, 从表中可以看出, 在干湿循环之前碳化试样的含水率要低于水泥土试样, 粉土碳化试样经过干湿循环后含水率增加量大于水泥土试样。粉质黏土碳化试样经过干湿循环后, 含水率较干湿循环前增长了一倍, 而水泥土试样增加幅度不大。

从表 4 可看出碳化试样经过干湿循环干密度有一定程度的下降, 而水泥土试样干密度则基本不变或小幅增加, 可能是由于干湿循环使碳化试样的内部变得疏松, 水泥土则由于内部水化反应的进行使试样更加密实。

每次循环中干循环和湿循环结束后, 对之前特别标注好的 3 个质量变化测试样进行质量测试直到 6 次循环结束, 并计算其质量变化率, 所得到的结果见图 6。其中质量变化率 w_n 的计算公式为

$$w_n = \frac{m_n - m_0}{m_0} \times 100\% \quad , \quad (1)$$

式中, w_n 为每次干循环或湿循环结束后的质量变化率, m_n 为每次干循环或湿循环结束后试样的平均质量, m_0 为干湿循环试验开始前试样的平均质量(碳化样取碳化完成后标准养护 1 d 的平均质量, 水泥土样取标准养护 28 d 后试样的平均质量)。

从试样的质量变化情况可以看出, 由于干湿循环过程中试样在干循环中失水质量有所下降, 而在湿循环中吸水质量有所上升, 因此试样的质量变化曲线呈波动形态。图 6 中负值表示质量减少的百分数, 正值表示质量增加的百分数。

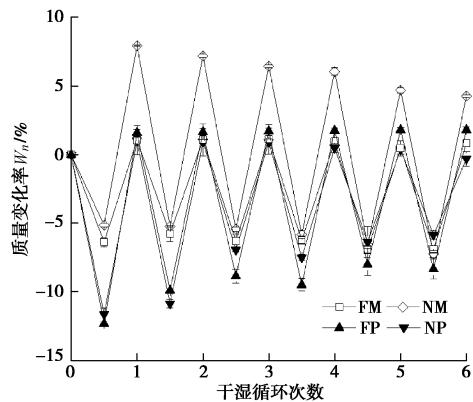


图 6 试样质量变化率随干湿循环变化图

Fig. 6 Variation of weight of samples under drying-wetting cycles

由于碳化试样初始含水率低于水泥土, 因此碳化试样第一次干循环质量减少率明显低于水泥土试样, 随着干湿循环的进行, 前者逐渐增加, 后者逐渐减少, 到第六级循环结束同一种土的干循环质量减少率已基本相近。从湿质量变化来看, 粉土碳化试样湿质量增加率略低于水泥土且随着干湿循环进行而缓慢降低, 水泥土则基本保持不变; 粉质黏土碳化试样第一次干

湿循环结束质量相比干湿循环前增加达到8%左右,而水泥试样只增加1%,随着干湿循环进行,粉质黏土碳化试样质量增加率逐渐减小到第六次循环的4%左右,而粉质黏土水泥试样湿质量增加率也同样小幅度减小,由第一次循环的1%下降到-0.3%左右。

从试样的外观变化上可以预测碳化试样抗干湿循环性能可能不及相同配比水泥土试样。从含水率、密度、干密度和质量变化率随干湿循环的变化来看,粉土碳化试样与粉质黏土碳化试样的抗干湿循环性能也存在差异。

2.2 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度测试结果见图7,图8为强度变化率随干湿循环次数的变化,强度变化率定义为干湿循环试样的强度与相同龄期标准养护试样强度之比。

从图7可以看出,经过干湿循环后碳化试样无侧限抗压强度都有不同程度的降低,其中粉土碳化试样在前3次干湿循环中强度有所降低,后保持稳定,从图8中可以看出经过6次干湿循环后粉土碳化试样残余强度仍能够达到标准养护试样的90%,但是粉质黏土碳化试样一次干湿循环后强度就有明显的衰减,残余强度只有35%左右。

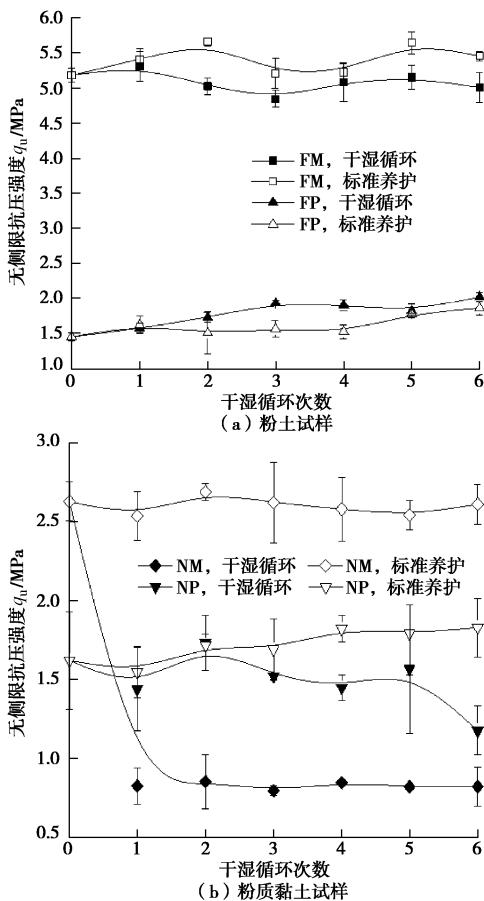


图7 试样干湿循环强度变化

Fig. 7 Variation of unconfined compressive strengths of different samples under drying-wetting cycles

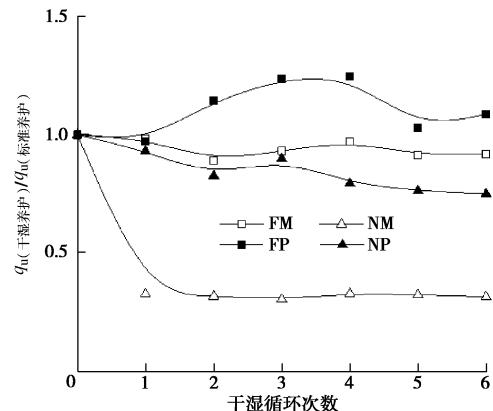


图8 试样强度变化率与干湿循环级数关系

Fig. 8 Variation rates of the strengths of different samples under drying-wetting cycles

对比相同配比水泥土试样,由于水泥土试样在标准养护28 d后进行干湿循环,水泥水化并不完全,因此随着养护时间的增加标准养护试样的无侧限抗压强度也有所提高,并且粉土水泥试样干湿循环试样的强度要高于标准养护试样。

2.3 E_{50} 及应力应变曲线

表5和图9是试样在每个干湿循环结束时的 E_{50} 变化情况,从图表中可以看出碳化试样的 E_{50} 值要明显高于水泥土试样,且碳化试样的 E_{50} 随着干湿循环的进行逐渐减小,而粉土水泥试样逐渐增加,粉质黏土水泥试样先增后减,粉土碳化试样6次循环后 E_{50} 仍能够保持在水泥土的1.5倍以上,但粉质黏土经过干湿循环后 E_{50} 已不及水泥土的一半,与无侧限抗压强度变化有类似的规律。

表5 试样变形模量 E_{50} 值

Table 5 Values of E_{50} of different samples under drying-wetting cycles (MPa)

试样	DW=0	DW=2	DW=4	DW=6
FM	570.0	543.5	475.8	478.5
FP	226.6	255.5	288.7	300.6
NM	271.2	115.4	90.4	93.4
NP	186.1	249.5	262.3	187.7

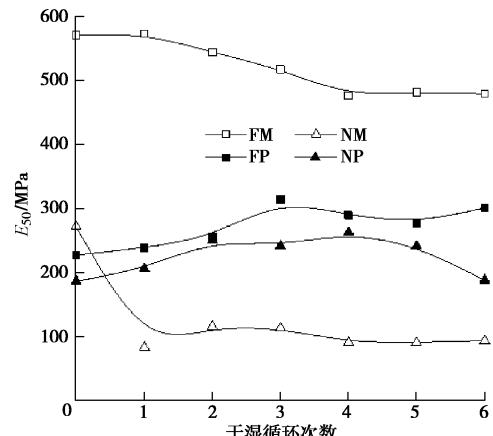


图9 试样变形模量 E_{50} 值随干湿循环次数的变化关系图

Fig. 9 Values of E_{50} of different samples under drying-wetting cycles

2.4 微观测试

根据无侧限抗压强度变化情况对碳化试样几个阶段的物质成分进行了XRD分析,如图10所示,图中碳化反应各物质所对应的物相峰值已用竖线标出。

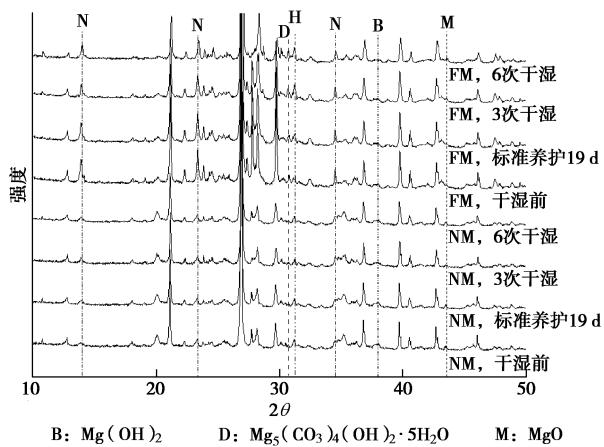


图 10 干湿循环对碳化固化土成分的影响

Fig. 10 Effect of drying-wetting cycles on composition of carbonated soils

从图10可以看出,干湿循环前试样中存在的碳酸镁石(Nesquehonite: $MgCO_3 \cdot 3H_2O$)、水碳镁石(Hydromagnesite: $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$)、球碳镁石(Dypingite: $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 5H_2O$)在经过3次及6次干湿循环后仍然存在,与没有经过干湿循环的试样相比可以看出的变化是粉土碳化试样碳酸镁石的峰值有一定程度的降低,而水碳镁石和球碳镁石的峰值有一定程度的提高。

图11~13分别为碳化试样干湿循环之前、标准养护19 d(与6次干湿循环对应)和6次干湿循环后的SEM图片。

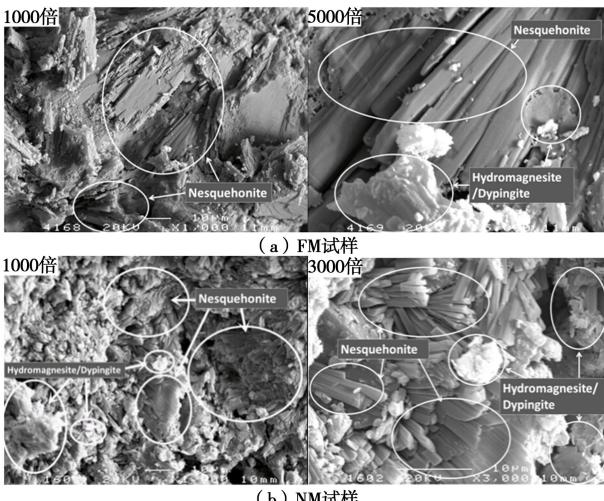


图 11 碳化试样干湿前 SEM 检测照片

Fig. 11 SEM pictures of carbonated soil samples before drying-wetting cycles

从图11,12比较可以看出标准养护条件下的碳化试样内部碳化产物的变化情况,干湿循环之前的碳化

试样以及标准养护19 d的试样都比较容易发现棱柱状晶体碳酸镁石(Nesquehonite: $MgCO_3 \cdot 3H_2O$)及花骨状和片状结构的水碳镁石(Hydromagnesite: $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$)和球碳镁石(Dypingite: $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 5H_2O$)的存在,碳化标准养护19 d试样与干湿前试样相比花骨状和片状结构更加明显,并且,棱柱状结构的末端有向片状结构发展的趋势。

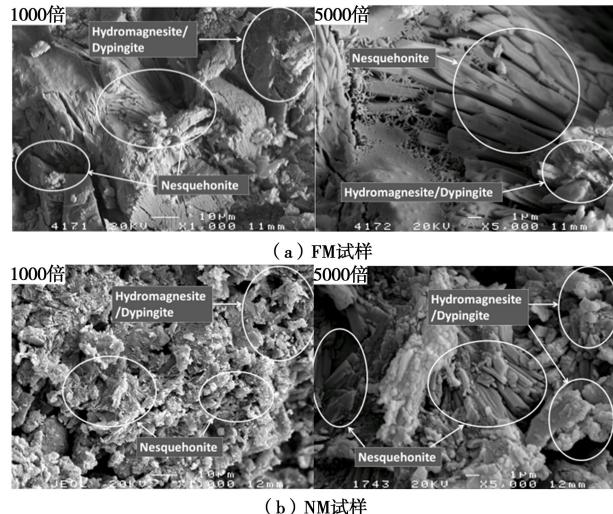


图 12 碳化试样标准养护 19 d 的 SEM 检测照片

Fig. 12 SEM pictures of carbonated soil samples after 19 days' standard curing

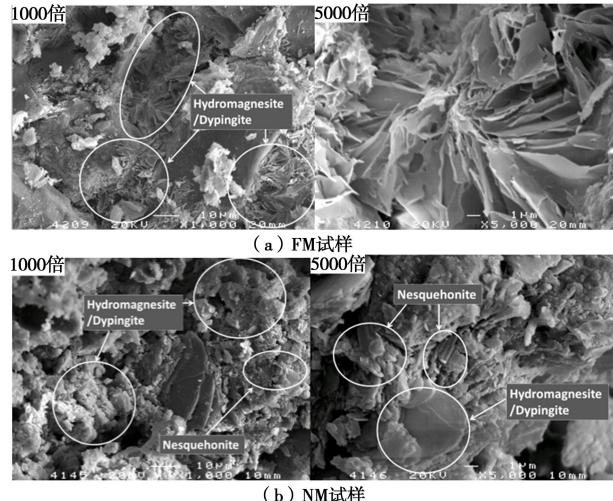


图 13 碳化试样 6 次干湿循环后的 SEM 检测照片

Fig. 13 SEM pictures of carbonated soil samples after 6 drying-wetting cycles

图14,15分别为粉土碳化3 h试样和粉质黏土碳化24 h试样干湿前后的MIP对比图。

从图中可以看出,粉土碳化3 h试样经过干湿循环后0.1~1 μm的孔隙减少,1~10 μm的孔隙增加,但是累积孔隙仍然保持在0.143 mL/g左右,与干湿循环前的0.133 mL/g相比并没有明显的增加,粉质黏土碳化24 h试样经过干湿循环后0.1~1 μm的孔隙显著增加,累积孔隙也从0.159 mL/g增加到了6次干湿循

环后的 0.214 mL/g , 并且 1 次干湿循环后的测试结果就已经与 6 次接近, 说明 1 次干湿循环就对粉质黏土试样的内部孔隙造成了比较大的影响并且累计孔隙体积在后几次干湿循环中基本保持稳定。

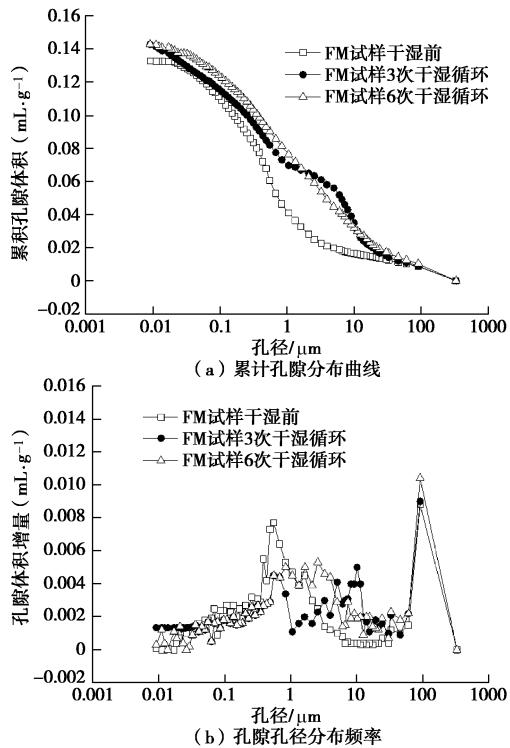


图 14 干湿循环对粉土碳化试样孔隙特征的影响

Fig. 14 Effect of drying-wetting cycles on pore distribution of carbonated silt

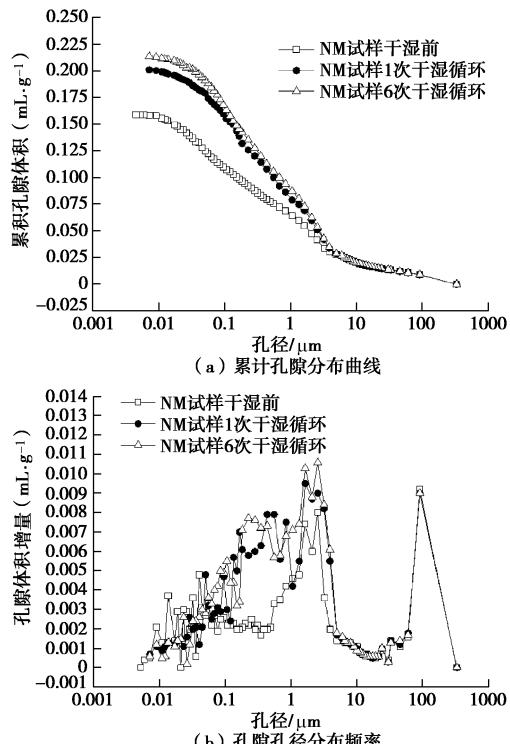


图 15 干湿循环对粉质黏土碳化试样孔隙特征的影响

Fig. 15 Effect of drying-wetting cycles on pore distribution of carbonated silty clay

3 讨论

Unluer 等^[17]在对氧化镁水泥试样的试验中证明了碳酸镁石 ($\text{Nesquehonite}: \text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 在外部条件缺水的情况下会失水转变为水碳镁石 ($\text{Hydromagnesite}: \text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 和球碳镁石 ($\text{Dypingite}: \text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)。

从表 3 含水率变化也可以看出, 干湿循环后粉土碳化试样含水率与干湿之前相比含水率增加量要远远低于粉质黏土碳化试样, 由于试样在烘箱中的时间为 48 h, 泡水时间为 24 h, 因此粉土试样更多的时间是处于相对比较干的状态, 因此碳酸镁石很容易由于缺水而转化为水碳镁石和球碳镁石; 然而粉质黏土试样由于吸水量大, 在 30°C 烘箱中 48 h 也很难烘干, 试样内部相对粉土试样来说是基本保持湿的状态, 因此粉质黏土试样内部碳化产物基本没有变化。因此出现“在本次试验中粉土碳化试样经过 6 次干湿循环后已经基本上很难发现棱柱状晶体碳酸镁石 ($\text{Nesquehonite}: \text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 的存在, 而花骨状和片状结构的水碳镁石 ($\text{Hydromagnesite}: \text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 和球碳镁石 ($\text{Dypingite}: \text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 则随处可见, 但是粉质黏土碳化试样干湿循环后的内部碳化产物变化并不明显”的现象。

从 MIP 测试分析可以看出, 粉土碳化试样干湿循环后累积孔隙相比粉质黏土试样增加程度不大, 说明粉土碳化试样经过干湿循环后仍然能够保持较高的密实度, 所以从强度上来看干湿循环并没有对粉土碳化试样造成大的影响。粉质黏土碳化试样在干循环结束开始泡水的过程中, 发现放入水中时试样表面就有明显的细小颗粒散落和大量气泡冒出的现象, 水快速大量的进入试样, 对试样内部有很大的冲刷作用, 内部结构的疏松也使碳化产物和土体之间的粘结力降低, 从而导致粉质黏土碳化试样无侧限抗压强度大大降低。

4 结论

本文对活性 MgO 碳化固化粉土和粉质黏土试样的干湿循环性能进行了研究, 并与相同掺量标准养护 28 d 后的水泥土试样进行了对比, 得到以下主要结论:

- (1) 干湿循环过后碳化固化土的干密度略有下降, 而水泥土试样基本不变。
- (2) 碳化固化粉土的无侧限抗压强度经过干湿循环后有一定程度的下降, 3 个循环后已基本稳定, 残余强度为标准养护的 90% 左右, 仍然达到 4 MPa 以上, 为水泥固化粉土的 2 倍, 具有较好的抗干湿循环性能。
- (3) 碳化固化粉质黏土经过干湿循环后的无侧限

抗压强度明显降低, 残余强度仅为标准养护条件下的35%左右, 而水泥固化粉质黏土经过多次循环后其强度仍然能够达到65%左右, 表明固化粉质黏土的抗干湿循环性能均较差, 且活性MgO碳化固化粉质黏土的抗干湿循环能力不如水泥固化粉质黏土。

(4)微观分析表明, 干湿循环对粉土碳化试样的累计孔隙影响不大, 因此粉土试样仍然具有比较大的密实度来保证试样的强度。粉质黏土碳化试样的孔隙增加明显, 试样变得疏松, 因此强度显著降低。

参考文献:

- [1] 刘松玉, 钱国超, 章定文. 粉喷桩复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 18 - 21. (LIU Song-yu, QIAN Guo-chao, ZHANG Ding-wen. The principle and application of dry jet mixing composite foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006: 18 - 21. (in Chinese))
- [2] 王定才. 粉磨-搅拌一体化: 中国商品混凝土产业的发展策略[J]. 混凝土, 2003(2): 20 - 23. (WANG Ding-cai. Grinding-stirring integration: The development strategy of China's commercial concrete industry[J]. Concrete, 2003(2): 20 - 23. (in Chinese))
- [3] 寇新, 李金峰. 煤炭是我国能源节约的重点[J]. 煤炭经济研究, 2004(8): 12 - 13. (KOU Xin, LI Jin-fen. Coal is the focus of China's energy conservation[J]. Coal Economic Research, 2004(8): 12 - 13. (in Chinese))
- [4] 李涛平. 中国水泥工业能效现状和节能潜力报告[J]. 水泥工程, 2004(4): 1 - 10. (LI Tao-ping. China's cement industry energy efficiency and energy saving potential Situation Report[J]. Cement Engineering, 2004(4): 1 - 10. (in Chinese))
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change. Sources of CO₂ [C]// IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, IPCC. Switzerland, 2004: 77 - 103.
- [6] World Business Council for Sustainable Development. The Cement Sustainability Initiative-Our Agenda for Action[C]// WBCSD, Conches-Geneva. Switzerland, 2002.
- [7] YI Y L, LISKA M, UNLUER C, et al. Carbonating magnesia for soil stabilisation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50: 899 - 905.
- [8] 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.
- [9] 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(11): 1699 - 1713.
- [10] 易耀林, MARTIN Liska, ABIR Al-Tabbaa, 等. 一种土壤的碳化固化方法及其装置[P]. 中国, 201010604013.1, 2010. (YI Yao-lin, LISKA M, AL-TABBA A, et al. A kind of soil carbonation curing method and device: China, 201010604013.1[P]. 2010. (in Chinese))
- [11] 易耀林, Martin Liska, Abir Al-Tabbaa, 等. 一种用于土体固化的绿色低碳固化剂[P]. 中国发明专利, 201010604325.2, 2010. (YI Yao-lin, LISKA M, AL-TABBA A, et al. A kind of low-carbon curing agent used for soil stabilization: China, 201010604325.2[P]. 2010. (in Chinese))
- [12] 易耀林. 基于可持续发展的搅拌桩新技术与理论[D]. 南京: 东南大学, 2013. (YI Yao-lin. Sustainable novel deep mixing methods and theory[D]. Nanjing: Southeast University, 2013. (in Chinese))
- [13] 李晨. 氧化镁活性对碳化搅拌桩加固效果影响研究[D]. 南京: 东南大学, 2014. (LI Chen. Influence of MgO activity on the stabilization efficiency of carbonated mixing method[D]. Nanjing: Southeast University, 2014. (in Chinese))
- [14] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for wetting and drying test of solid wastes[S]. US: ASTM International, 2009
- [15] ESTABRAGH A R, PERESHKAFTIB M R S, PARSAEIC B, et al. Stabilised expansive soil behavior during wetting and drying[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2013, 14(4): 418 - 427.
- [16] AHMED A, UGAI K. Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 66: 84 - 92.
- [17] UNLUER C, Al-Tabbaa A. Enhancing the carbonation of MgO cement porous blocks through improved curing conditions[J]. Cement and Concrete Research, 2014(59): 55 - 65.