

DOI: 10.11779/CJGE201406025

氯化镁对水泥土早期强度的影响研究

韩鹏举, 张文博, 刘新, 白晓红

(太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 通过水泥加固不同含量的氯化镁污染土室内 28 d 抗压强度、X 射线衍射 (XRD) 和微观扫描电镜试验 (SEM), 研究了氯化镁对水泥土的早期强度影响机理。XRD 分析结果表明: 氯化镁参与反应生成的 M-S-H、M-A-H、氯化钙结晶、轻质氯化镁结晶和水化氯铝酸钙等产物对水泥土产生分解与结晶的复合作用; SEM 图象分析表明: 氯化镁使水泥土的孔径分布发生改变, 当氯化镁含量较低时, 水泥土中的水泥水化产物与结晶物将颗粒连结在一起, 形成较强的结构联结, 使其孔隙率变小, 对水泥土的强度增长有利; 随着氯化镁含量增大, 土颗粒周围的凝胶物被分解, 使水泥土的孔隙率增大与胶结程度下降, 对水泥土的强度不利。

关键词: 污染土; 氯化镁; 抗压强度; 孔隙率; 腐蚀

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)06-1173-06

作者简介: 韩鹏举(1981-), 男, 山西榆社人, 副教授, 主要从事环境岩土工程等方面的研究。E-mail: 13834569544@163.com。

Early strength of cemented soils polluted by magnesium chloride

HAN Peng-ju, ZHANG Wen-bo, LIU Xin, BAI Xiao-hong

(College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to study the influence of the magnesium chloride in the polluted soils on the early strength of cemented soils after 28 days, unconfined compression tests, X-ray Diffraction (XRD) phase tests and scanning electron microscope (SEM) tests are employed to study the mechanism of cement-reinforced soils contaminated by different content magnesium chlorides. The strength test results show that the compressive strength of the cemented soils decreases with the increase of the content of magnesium chlorides. The value reaches its peak when the content is 1.5 g/kg, while it is the lower when the content is greater than 1.5 g/kg. Chemical products are analyzed by means of the XRD tests, and the test results show that chemical products become more, such as M-S-H, M-A-H, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, after the participation of the magnesium chlorides in chemical reactions. Those chemical products play the role of decomposition and crystallization composite action in the chemical reaction process. At the same time, these products change the pore size distribution of cemented soils. From the SEM photos of cemented soil form, the chemical products in the sample with lower magnesium chloride content link the soil particles together, and decrease the porosity. With the increasing content of magnesium chlorides, the gel around soil particles is broken down, and the porosity increases, which make the strength of cement soils decrease.

Key words: polluted soil; magnesium chloride; compressive strength; porosity; corrosion

0 引言

由于致污物质的侵入, 成分、结构和性质发生了显著变异的土, 应判定为污染土。污染土对建筑材料的腐蚀性, 可分为微、弱、中、强 4 个等级。污染对土的工程特性的影响程度分为轻微、中等和大 3 个等级^[1]。水泥土技术广泛应用于各种地基处理中, 由于局部地区污染土的日益增多, 水泥土的应用范围受到了限制。一般而言, 水泥土应用于硫酸盐和有机质含量较高的地区效果不明显^[2]。Perera 等^[3]通过强度试验、浸出液 pH 值测试和 XRD 测试, 研究了高温和二

氧化碳(加速碳化)环境下采用水泥、粉煤灰、石灰和膨润土 4 种固化物分别处理重金属(铅、铜、镉、镍和锌混合物)污染土的性能。Heineck 等^[4]通过 XRD、SEM 和能谱分析(energy dispersive spectrometer, EDS)研究了水泥和膨润土加固 5% 的苛性钠污染土的微观结构与力学性能, 得出土: 膨润土: 水泥: 水=100: 12: 25: 100 这个配方可有效加固苛性钠污染土。邢

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208333, 51078253); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20111402120001)

收稿日期: 2013-08-18

皓枫等^[5-6]通过水泥加固江苏省连云港地区高含盐软土的室内强度试验,探讨了高含盐水泥土中 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 离子含量变化对水泥土强度的影响,并借助 XRD 和 SEM 技术来研究可溶盐离子引起水泥土强度增长的过程和机理,研究结果表明 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 离子含量越高负面影响越大,不仅改变水泥土微观结构,而且抑制 C-S-H 和 C-A-H 的生成,从而导致水泥土强度降低。马冬梅也通过连云港地区高含盐软土的无侧限抗压强度试验和 SEM 及 XRD 技术,研究了高含盐量特征对水泥土强度影响的内在原因,结果表明: Mg^{2+} 和 Cl^- 都对水泥土强度起了不同程度的负面作用,其中 Cl^- 对早期和长期强度都有影响,而 Mg^{2+} 从中期开始发挥作用。杨俊杰等^[7]通过微型贯入试验及化学成份分析试验,得出海水环境下水泥土的劣化进展较快;劣化深度有随水压力增大的趋势^[8]。宁宝宽等^[9]研究了水泥土在各种环境因素影响下的力学特性、侵蚀效应、破裂特征及破裂机理。黄雨等^[10]从化学成分与物理结构等微观角度出发分别对冲填土和自然软土的原状样、加固样进行了 XRD 和 SEM 试验,对比分析了导致这种加固效果差异的微观机理及其形成原因,得出水泥土搅拌法加固冲填土与自然软土的化学反应是类似的,但加固后的土体在微观结构特征上却差异显著,并导致加固土体宏观强度表现上的不同。从以上研究可以看出强度试验、SEM 和 XRD 测试技术是研究水泥土固化机理的主要手段,同时微观定量评价和多角度阐述污染土中水泥土的固化机理也逐渐得到应用^[11-12]。氯化镁污染土产生的来源比较广泛,主要有冶金行业中电解冶炼金属镁、化学工业中制作各种镁盐和建材行业中烧制镁质水泥等产生的三废进入土壤形成氯化镁污染土。因此在污染土对混凝土的腐蚀性评价中其中镁离子是主要腐蚀介质之一;同时在高盐含量地区中,氯盐也是最主要的易溶盐之一。因此研究镁盐和氯盐对水泥土强度的影响具有重要的理论意义与实用价值。本文通过水泥加固不同含量氯化镁污染土的无侧限抗压强度试验、XRD 测试和 SEM 试验,研究了水泥加固不同含量的氯化镁污染土 28 d 的抗压强度变化规律,同时结合化学反应方程、水化产物的物相、微观结构、孔径分布,研究了氯化镁对水泥土的早期强度影响机理。

1 试验方案

1.1 水泥土试块制备

水泥土中使用的土取自太原某工地,风干、碾碎并过 2.36 mm 的筛,其物理性质和成分分析分别见表 1, 2; 水泥使用太原狮头水泥公司生产的普通硅酸盐

水泥 42.5[#]。参考《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001) 污染土对混凝土的腐蚀性评价标准,将氯化镁调配成 5 种不同浓度的溶液(其中一种溶液中的掺量为 0),按氯化镁溶液 50 g 和风干土 100 g 的比例搅拌后形成不同含量的污染土,污染土静置 24 h 使氯化镁与土充分混合;按污染土 150 g 和水泥 20 g 的配比分别称取相应的污染土和水泥放入 30 kg 的小型搅拌机内,分别充分搅拌后,装入 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 的标准钢模中,并在振动台上振动 40 s,抹平表面、静置编号,编号规则与水泥土的配方见表 3; 24 h 后拆模,放置在预设温度为 20.9℃,相对湿度为 90.7% 的标准养护箱中养护 28 d 后进行测试。

表 1 土的物理性质指标

比重 d_s	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
2.70	27.8	19.0	8.8	11.8	3.258

表 2 土的介质成分

Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	易溶盐含量
0.154	0.101	0.11	0.216	0.138	1.72

表 3 水泥土的配方表

编号	氯化镁溶液浓度/(g·L ⁻¹)	污染土的氯化镁含量/(g·kg ⁻¹)	水泥土的氯化镁含量/(g·kg ⁻¹)	水泥掺入比/%
W	0	0	0	13.3
MC1	5.1	1.7	1.5	13.3
MC2	15.3	5.1	4.5	13.3
MC3	20.4	6.8	6.0	13.3
MC4	30.6	10.2	9.0	13.3

1.2 无侧限抗压强度试验

养护 28 d 后,对每组水泥土试块进行抗压强度试验,取 3 个试块的平均值为水泥土的无侧限抗压强度。所用仪器为甘肃生产的电子控制式万用实验机(型号为 5105A),最大荷载为 100 kN,加载精度为 0.5 级,加载速率为 5 mm/min。

1.3 微观图片的获取与处理

将抗压强度试验后的水泥土残块进行切块,制备成长宽高为 30 mm×20 mm×15 mm 的微观试样粗胚,达到表面平整、清洁,表面没有明显麻点,将粗胚置于 25±3℃ 的通风柜中自然脱水干燥后,用不同型号砂纸打磨试样,最小为 1200 号砂纸,用气吹除浮尘,形成微观样品细胚;采用北京中科科仪技术发展有限责任公司生产的 SBC-12 小型离子溅射仪镀金膜,镀膜完成即放入 HITACHI TM-1000 型扫描电镜观测。测试时在低倍数下选定观测点,为了避免重复调焦,按照由大到小的放大倍数进行连续的扫描成像,通过

调节图像的亮度、对比度和焦距, 在成像最为清晰时保存成 BMP 格式的图片。本次试验采用 6000 倍、4000 倍、2000 倍、1000 倍、500 倍和 200 倍 6 个放大倍数。利用 Image-ProPlus6.0 (IPP 6.0) 分析软件对水泥土 SEM 图像进行处理、分析, 计算图像孔隙率, 即图像的孔隙面积比。对于 SEM 图像的孔隙率与土工试验测得的孔隙率有一定的区别, 不同的放大倍数下 SEM 图像的孔隙信息是不同的, 低倍数下主要是获取大孔隙的分布信息, 小孔隙的信息就不能完全反映出来; 反之高倍数是获取较小孔隙、土结构性与颗粒之间联结的信息, 有可能观测不到大孔隙; 同时 SEM 图像的孔隙率与采集的图像面积大小与像素有直接关系, 反映的是在一个平面内孔隙的含量, 即试样在二维空间内的孔隙含量; 土工试验测得的孔隙率为试样在三维空间内的孔隙含量, 故二者之间在定义上和测试精度上都存在着一定的差异。

1.4 水泥土的成分测试

在第 28 天, 将进行抗压强度试验后的水泥土样品研磨通过 0.080 mm 方孔筛, 称取 5 g 试样水泥土粉末, 填充在有开槽的平整玻璃板上, 施加一定压力使样品黏牢, 同时注意使颗粒方向随机分布。采用 TD3500XRD 衍射分析仪进行水泥土的物相分析, 测试采用连续扫描测量法, 扫描的起始角为 20° , 终止角为 70° , 扫描速度为 0.020/s。XRD 物相采用 JADE5.0 软件进行分析, 根据衍射峰的高度估计出各衍射线的相对强度, 用尝试法和初步估计的方法找到可能的物相, 同时根据水泥土试样的实际成份做出推断。

2 试验结果及分析

2.1 无侧限抗压强度分析

图 1 给出了不同氯化镁含量下 28 d 的水泥土的无侧限抗压强度 q_u , 由图 1 可知: 水泥土中氯化镁含量为 1.5 g/kg 时 (试样 MC1) 强度达到最大值 4.90 MPa, 较未掺氯化镁的水泥土 (试样 W) 的强度 4.57 MPa 增长 7.22%, 氯化镁含量为 6.0 g/kg (试样 MC3) 和 9.0 g/kg (试样 MC4) 的水泥土强度分别比未掺氯化镁的水泥土 (试样 W) 强度降低 10.50% 和 21.88%, 为 4.09 MPa 和 3.57 MPa; 比较试样 MC1 和试样 MC4 的强度得出, 试样 MC4 的强度较试样 MC1 的强度降低 27.1%。综上所述含有氯化镁的水泥土强度除试样 MC1 外, 其他试样较未掺氯化镁的水泥土 (试样 W) 都有不同程度的降低; 同时水泥土的抗压强度随着氯化镁含量的增加而降低, 说明在氯化镁含量较低时 (含量小于等于 1.5 g/kg), 氯化镁的存在对水泥土的强度

增长有利, 随着氯化镁含量增大 (含量大于 1.5 g/kg), 对水泥土的强度不利, 在工程实践中应引起重视。

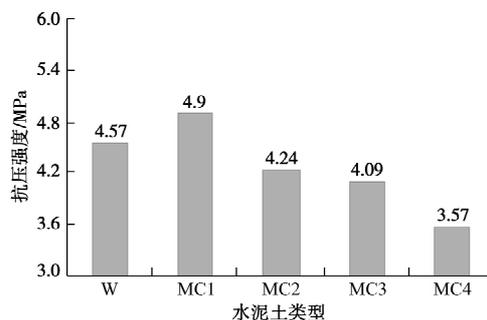


图 1 水泥土的抗压强度

Fig. 1 Compressive strength of cemented soils

2.2 XRD 试验结果分析

对 5 个试样进行 XRD 测试分析, 见图 2。由图 2 可知, 含氯化镁的水泥土试样 (MC1~MC4) 与试样 W 的物相成份有一定的差异。水泥加固土时主要通过水泥的水解和水化反应、黏土颗粒与水泥水化物的作用和碳化反应 3 个过程, 形成以水泥水化产物 C-S-H、C-A-H 和 C-A-S-H 为主要胶结土颗粒的空间整体, 当固化剂中含有氯化镁时, 还会发生如下反应:

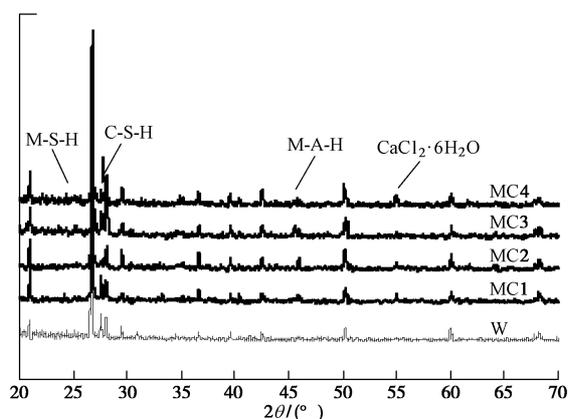
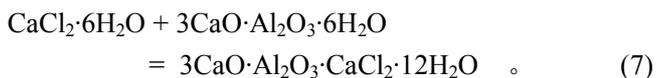
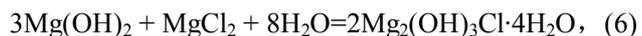
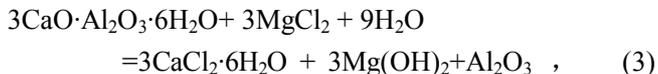
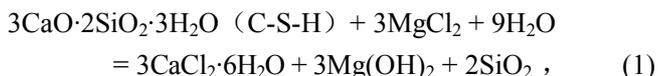


图 2 28 d X 射线衍射图

Fig. 2 X-ray diffraction of 28 d samples of cemented soils

从 XRD 分析试验结果可以看出, 含氯化镁的水泥土试样中 C-S-H 峰值变弱 (图中 $25^\circ \sim 30^\circ$ 之间箭头指示位置) 而产生较多的 M-S-H (图中 25° 左右箭

头指示位置)、M-A-H(图中 $45^\circ \sim 50^\circ$ 左右箭头指示位置)和 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (图中 55° 左右箭头指示位置)。

氯化镁与水泥水化产物C-S-H发生化学反应(1)生成氯化钙结晶($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、水镁石($\text{Mg}(\text{OH})_2$)和游离的石英(SiO_2),同时水镁石与游离的石英进一步发生反应(2)生成难溶于水的M-S-H;同理氯化镁与水泥水化产物C-A-H发生化学反应(3)和(4)生成M-A-H。生成的M-S-H和M-A-H胶结强度较C-S-H低,且可分散在水泥土中,使的水泥土胶结性变差。

氯化镁同时可与水泥土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应(5)再次生成氯化钙结晶($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、水镁石($\text{Mg}(\text{OH})_2$),水镁石除发生化学反应(2)外,同时再发生化学反应(6)生成轻质氯化镁结晶($\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$);氯化钙结晶($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)与水化产物C-A-H发生化学反应(7)生成水化氯铝酸钙($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$),其中轻质氯化镁结晶和水化氯铝酸钙可使水泥土结晶膨胀,同时抑制了水泥土中C-S-H、C-A-H和C-A-S-H的生成,从宏观上引起水泥土力学性能降低。

从以上化学分析可知化学反应(1)~(4)主要生成M-S-H和M-A-H,分解了水泥土中的C-S-H和C-A-H,使水泥土的胶凝性变差,起分解作用;而化学反应(5)~(7),则是生成氯化钙结晶、轻质氯化镁结晶和水化氯铝酸钙,使水泥土结晶膨胀,起结晶作用。因此氯化镁对水泥土的影响是分解与结晶的复合作用。

2.3 微观结构及机理分析

图3给出了2000倍下不同含量氯化镁的水泥土的SEM图像。试样W中水泥水化反应产生絮(网)状的C-S-H和C-A-H将原土中单粒结构的土颗粒黏结起来,形成较强的结构联结(图3(a))。当水泥土中的氯化镁含量为 1.5 g/kg 时(图3(b)),其基本单元体以土颗粒单元体和絮凝体组成,同时有粒状体和结晶体相对独立分散在颗粒横截面上,结晶体较粗大,多呈棒状、针状分布于土体中,结构单元体多呈团聚状结构出现。由于在氯化镁中氯镁的重量比为 $71:24$,氯离子起主要作用,由XRD分析中的氯化钙结晶、轻质氯化镁结晶和水化氯铝酸钙对水泥土的强度影响较大,在水泥土中起到了胶结物的作用,使土颗粒之间的联结强度增强,使土的结构强度呈现增长趋势^[7]。当水泥土中氯化镁含量大于 1.5 g/kg 时,颗粒表面及颗粒之间存在着不同程度的硅酸盐水化物,同时随着氯化镁含量的增大,氯离子和镁离子同时起作用,导致水化产物呈减小趋势,颗粒间的胶结物呈现出薄片状的M-S-H和

M-A-H,同时有水镁石沉淀堆积在孔隙中,在外力的作用下可沿接触面变形与错动,使水泥土强度降低(图3(c)、3(d))^[8]。

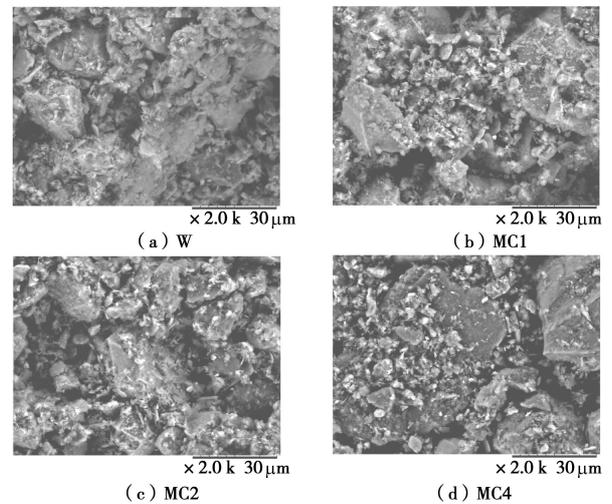


图3 水泥土样的微观结构图像($\times 2000$)

Fig. 3 SEM photos of cemented soils (2000 times)

图4给出了4000倍下经IPP处理前后的试样MC1(强度最高)和试样MC4(强度最低)的微观照片,同时计算其孔隙率。由图4可知试样MC1的结构中水泥水化产物与结晶物将颗粒联结在一起,形成较强的结构联结,构成“粒状-镶嵌-胶结”结构(图4(a)),孔隙较小,孔隙统计个数为224,孔隙率仅为0.339(图4(c));试样MC4中土颗粒周围的凝胶物已经被分解,同时沉淀在颗粒周围,使颗粒周围的大孔隙发育且连通性较好,孔隙个数降至161,孔隙率高达0.468,较试样MC1的孔隙率0.339提高了38%,使试样的密度与胶结程度下降,导致其强度下降(图4(b)、(d))。

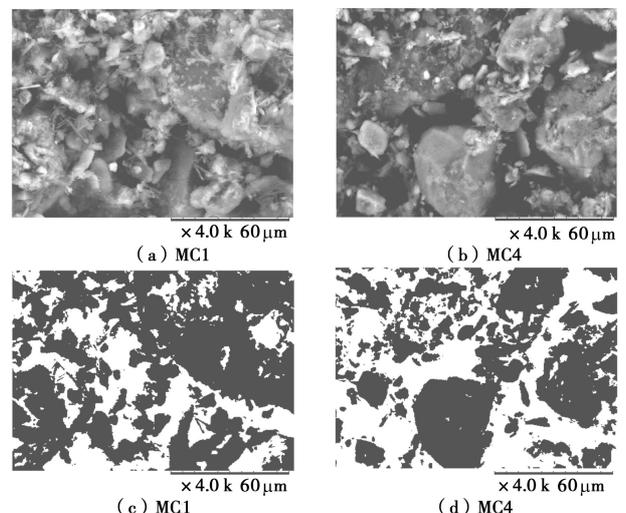


图4 处理前后的试样SEM图像对比(4000倍)
试样MC1此图孔隙率: 0.339, 孔隙统计个数: 224;
试样MC4此图孔隙率: 0.468, 孔隙统计个数: 161。

Fig. 4 Comparison of SEM photos processed by IPP software

2.4 孔隙计算分析

经 Image-ProPlus6.0 分析软件分别对每个试样 6000 倍、4000 倍、2000 倍、1000 倍、500 倍和 200 倍 6 个放大下倍数的微观结构图像进行处理、分析, 计算其孔隙率, 其中在 1000 倍数下, 其孔隙率达到最高值, 因此确定放大 1000 倍为孔隙分析的最佳取值放大倍数^[13], 各种试样的黑白二值化图见图 5; 计算每个图片的孔隙率与孔径分布, 见表 4。

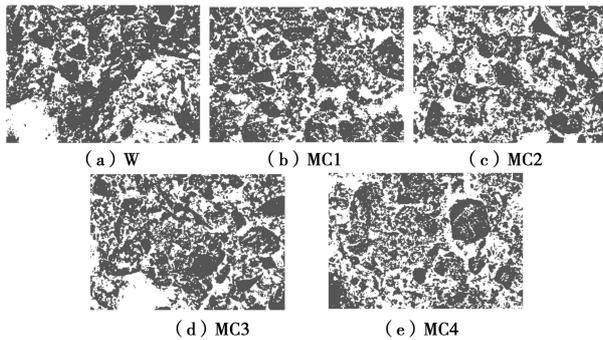


图 5 处理后的试样 SEM 图像 (1000 倍)

Fig. 5 SEM photos processed by IPP 6.0 software

表 4 试样微观结构孔径统计分析表

Table 4 Sampling pore analysis of microstructure

试样 (1000 倍)	各类孔隙 (μm) 所占孔隙的百分比/%					孔隙率
	<2	2~5	5~20	20~50	>50	
W	3.81	9.15	30.26	25.34	31.43	0.360
MC1	4.64	9.25	28.80	29.03	28.29	0.349
MC2	2.90	6.43	35.81	37.43	17.43	0.407
MC3	3.34	5.68	33.69	42.95	14.34	0.380
MC4	4.10	6.44	9.42	49.71	30.33	0.410

比较表 4 可知, 试样 MC1 的 SEM 图像孔隙率最低为 0.349, 次之试样 W, 其孔隙率为 0.360, 而当氯化镁含量为 9.0 g/kg 时 (试样 MC4), 其 SEM 图像的孔隙率达到 0.410。说明, 当氯化镁含量为 1.5 g/kg 时, 对水泥土的孔隙起到了填充作用, 致使其孔隙率最小, 强度大于未含氯化镁的水泥土 (试样 W); 随着氯化镁含量的增大, 孔隙率增大, 强度降低。

根据平均直径的大小, 试样的微观孔隙可以分成以下 5 类: 孔洞 ($>50 \mu\text{m}$), 大孔隙 ($20\sim50 \mu\text{m}$), 中孔隙 ($5\sim20 \mu\text{m}$), 小孔隙 ($2\sim5 \mu\text{m}$), 微孔隙 ($<2 \mu\text{m}$)^[14]。从表 4 中的孔径分布统计分析可知, 由于氯化镁的影响, 水泥土的孔径分布发生了改变。在所有试样的 SEM 图中, 试样 MC1 的微孔隙 ($<2 \mu\text{m}$) 和小孔隙 ($2\sim5 \mu\text{m}$) 的比例均最大, 分别为 4.64% 和 9.25%; 试样 MC4 的中孔隙 ($5\sim20 \mu\text{m}$) 比例最小, 只有 9.42%; 由图 6 可知, $2\sim5$, $2\sim20$, $2\sim50 \mu\text{m}$ 的比例均随着氯化镁含量的增大而呈现出先增大后减小的趋势; 分析孔径大于 $>20 \mu\text{m}$ 的分布规律, 较试样 MC4 的 80.04%, 其他试样孔径大于 $20 \mu\text{m}$

的比例均小于 60% (W=56.77%, MC1=57.31%, MC2=54.86%, MC3=57.29%); 孔洞 ($>50 \mu\text{m}$) 的百分比随着氯化镁含量呈先减小后增大趋势, 在试样 MC3 时达到最小, 只有 14.34%。因此可以推断得出, 在观测到的 SEM 图像中, 氯化镁使水泥土的孔径分布发生了改变, 由于孔径分布不同导致其孔隙率的变化, 孔隙率不同引起其强度的差异。

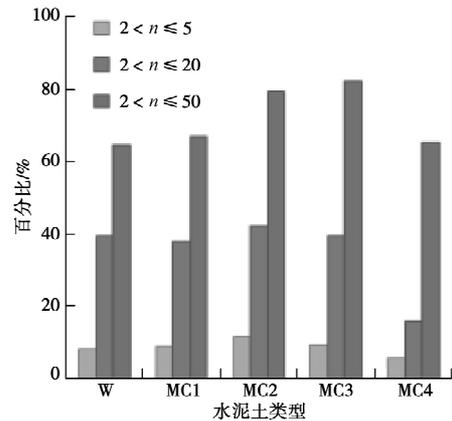


图 6 试样微观结构孔隙平均直径累计图

Fig. 6 Cumulative diagram of average diameter of pore

3 结 论

(1) 水泥土的抗压强度随着氯化镁含量的增加而降低, 氯化镁含量较低时, 氯化镁的存在对水泥土的强度增长有利, 随着氯化镁含量增大, 对水泥土的强度不利, 在工程实践中应引起重视。

(2) 通过 XRD 试验分析得出氯化镁参与反应生成的 M-S-H 和 M-A-H 分解了水泥土中的 C-S-H 和 C-A-H, 使水泥土的胶凝性变差, 起分解作用; 而生成的氯化钙结晶、轻质氯化镁结晶和水化氯铝酸钙, 使水泥土结晶膨胀, 起结晶作用。因此氯化镁对水泥土强度的影响是分解与结晶的复合作用。

(3) 由微观结构图分析可知氯化镁含量较低时, 水泥土微观结构中水泥水化产物与结晶物将颗粒连接在一起, 形成较强的结构联结, 构成“粒状-镶嵌-胶结”结构; 随着氯化镁含量增大, 土颗粒周围的凝胶物被分解, 使颗粒周围的大孔隙发育且连通性较好, 使试样的密实度与胶结程度下降, 导致其强度下降。

(4) 通过对 SEM 图像 IPP 处理、分析与计算水泥土的孔隙率与孔径分布得出, 氯化镁使水泥土的孔径分布发生了改变, 导致孔隙率发生变化, 引起了水泥土强度的差异。

参考文献:

[1] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2009. (GB 50021—

- 2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2009. (in Chinese))
- [2] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 2012. (JGJ 79—2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. 2012. (in Chinese))
- [3] PERERA A S R, AL-TABBAA A. The influence of different curing environments on the behavior of cement-based grouts used in contaminated soil treatment[J]. Geotechnical Special Publication, 2004, **126**(2): 1412 - 1420.
- [4] HEINECK K S, LEMOS R G, LAUTENSCHLAGER C E R, et al. Behavior of vertical hydraulic barriers composed by sandy soil, bentonite and cement subjected to alkaline contaminants[C]// Proceeding of Geoflorida 2010: Advance in Analysis, Modeling and Resign. West Plam Beach, 2010: 2462 - 2471.
- [5] 邢皓枫, 徐超, 叶观宝, 等. 可溶盐离子对高含盐水泥土强度影响的机理分析[J]. 中国公路学报, 2008, **21**(6): 26 - 30. (XING Hao-feng, XU Chao, YE Guan-bao, et al. Mechanism analysis of influence of soluble salt rich on strength of salt-rich cement-soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, **21**(6): 26 - 30. (in Chinese))
- [6] 邢皓枫, 徐超, 叶观宝. 水泥加固高含盐软土的强度和微观结构研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, **36**(12): 1606 - 1610. (XING Hao-feng, XU Chao, YE Guan-ba. Strength and microstructure of salt-rich soft soil improved by cement[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, **36**(12): 1606 - 1610. (in Chinese))
- [7] 马冬梅. 可溶盐对水泥土强度影响的微观分析[J]. 公路交通科技, 2008, **25**(4): 16 - 21. (MA Dong-mei. Microstructural analysis of influence of soluble ions on strength of cemented soil[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, **25**(4): 16 - 21. (in Chinese))
- [8] 杨俊杰, 孙涛, 张玥宸. 腐蚀性场地形成的水泥土的劣化研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(1): 130 - 138. (YANG Jun-jie, SUN Tao, ZHANG Yue-chen. Deterioration of soil cement stabilized in corrosive site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(1): 130 - 138. (in Chinese))
- [9] 宁宝宽, 陈四利, 刘斌. 水泥土的环境侵蚀效应与破裂过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(10): 1778 - 1782. (NING Bao-kuan, CHEN Si-li, LIU Bin. Fracturing behaviors of cemented soil under environmental erosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(10): 1778 - 1782. (in Chinese))
- [10] 黄雨, 周子舟, 柏炯, 等. 水泥土搅拌法加固冲填土软土地基的微观试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, **38**(7): 997 - 1001. (HUANG Yu, ZHOU Zi-zhou, BAI Jiong, et al. Micro-experiments in cement-mixed soils on a dredger fill of soft ground[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, **38**(7): 997 - 1001. (in Chinese))
- [11] 王清, 陈慧娥, 蔡可易. 水泥土微观结构特征的定量评价[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊 1): 12 - 16. (WANG Qing, CHEN Hui-e, CAI Ke-yi. Quantitative evaluation of microstructure features of soil contained some cement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S1): 12 - 16. (in Chinese))
- [12] 于小军. 水泥土芯样的微观结构特征研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, **36**(5): 123 - 125. (YU Xiao-jun. Research on structure of cemented soil[J]. Sichuan Building Science, 2010, **36**(5): 123 - 125. (in Chinese))
- [13] 王梅, 白晓红, 梁仁旺, 等. 生石灰与粉煤灰桩加固软土地基的微观分析[J]. 岩土力学, 2001, **22**(1): 67 - 70. (WANG Mei, BAI Xiao-hong, LIANG Ren-wang, et al. Micro study on soft foundations reinforcement with lime-fly ash piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(1): 67 - 70. (in Chinese))
- [14] 崔德山, 项伟. ISS 加固红色黏土的孔隙分布试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3096 - 3100. (CUI De-shan, XIANG Wei. Pore diameter distribution test of red clay treated with ISS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3096 - 3100. (in Chinese))