

高含盐水泥土的力学特性及微观结构研究

邢皓枫, 张 好, 李浩铭

Mechanical characteristics and microstructure of salt-rich cement-soil

XING Haofeng, ZHANG Hao, and LI Haoming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing–thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109–115

尺寸和加载速率对冻结水泥土单轴压缩影响

Effect of size and loading rate on the uniaxial compression characteristics of frozen cement soil

陈鑫, 张泽, 李东庆 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 74–82

分级循环动荷载下水泥土动力特性试验研究

An experimental study of the dynamic characteristics of cement soils subjected to staged cyclic loading

张振, 陈勇, 杨天亮, 叶观宝, 郑文强 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 89–96

单轴压缩下红色砒砂岩水泥土的能量演化机制研究

Energy evolution mechanism of red Pisha–sandstone cement soil under uniaxial compression

耿凯强, 李晓丽 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 134–141

云母影响水泥软黏土强度的试验研究

Experimental research on the influence of mica on strength of cement–reinforced soft clay

张亚玲, 赵晓彦, 严群 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 101–108

融化压缩下水泥改良冻土的微观孔隙特征演变

Microcosmic pore characteristics evolution of the cement improved frozen soil after thawing compression

尹振华, 张建明, 张虎, 王宏磊 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 97–105



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009037

高含盐水泥土的力学特性及微观结构研究

邢皓枫, 张 好, 李浩铭

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 为研究 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 三种可溶盐离子对高含盐水泥土强度的影响, 通过室内不同龄期水泥土无侧限抗压强度试验, 分析可溶盐离子含量变化对水泥土强度的影响及其变化规律, 并利用 X 射线衍射 (XRD) 和环境扫描电镜 (ESEM), 研究可溶盐离子对高含盐水泥土的微观结构和化学组分的影响, 从宏微观的角度揭示可溶盐离子与水泥土之间的作用机理。研究表明: Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 三种可溶盐离子对试块的强度有不同程度的负作用, 且随可溶盐离子含量的增加, 负作用越明显; 造成这种现象的原因主要在于, 高含量的可溶盐离子参与反应, 消耗 C-S-H 和 C-A-H 凝胶, 生成 M-S-H、M-A-H 和大量结晶物, M-S-H 和 M-A-H 分散于 C-S-H 和 C-A-H 凝胶中, 降低水泥土的胶结力, 使得高含盐水泥土强度降低。

关键词: 可溶盐离子; 高含盐水泥土; 无侧限抗压强度测试; X 射线衍射; 环境扫描电镜

中图分类号: TU411.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0102-08

Mechanical characteristics and microstructure of salt-rich cement-soil

XING Haofeng, ZHANG Hao, LI Haoming

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to examine the effect of Mg^{2+} , Cl^- and SO_4^{2-} on the strength of salt-rich cement-soil, a series of unconfined compression tests of salt-rich cement-soil with different curing ages are carried out to analyze the change of the strength with different contents of soluble salt ions. The techniques of X-ray diffraction (XRD) and environmental scanning electron microscopy (ESEM) are used and the effects of soluble salt ions on the microstructure and chemical compositions of the salt-rich cement-soil are also studied. The interaction mechanism between the soluble salt ions and cement soil is revealed from the macro and micro perspectives. The research results indicate that Mg^{2+} , Cl^- and SO_4^{2-} have negative influence on the strength of cement soil. The strength of the cement soil decreases with the increasing soluble salt ion content and that the coexistence of multiple corrosive ions has a greater effect than any single ion. The reason for this phenomenon is that the high contents of soluble salt ions participate in the chemical reaction. C-S-H gel and C-A-H gel are consumed in the process of reaction. Meanwhile, M-S-H, M-A-H and a large amount of crystals are also generated. M-S-H and M-A-H are dispersed in C-S-H gel and C-A-H gel, which reduces the cementing force of cement soil and makes the strength of salt-rich cement-soil decrease.

Keywords: soluble salt ions; salt-rich cement-soil; unconfined compressive tests; XRD; ESEM

深层搅拌技术是一种将软土与固化剂 (包括水泥、粉煤灰、复合固化剂等) 搅拌混合的地基加固技

术^[1-4]。鉴于深层搅拌技术具有提高地基承载力、减少地基沉降变形、施工简单以及工程造价低廉等优

收稿日期: 2020-09-15; 修订日期: 2020-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41172247); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (22120180313)

第一作者: 邢皓枫 (1969-), 男, 副教授, 博士, 主要从事软土地基处理及边坡支护研究。E-mail: hfxing@tongji.edu.cn

通讯作者: 张好 (1994-), 男, 博士研究生, 主要从事软土地基处理及边坡支护研究。E-mail: zhao0106@163.com

势,在道路、机场、港口等软土地基处理中被广泛使用^[2-3]。然而,对于海相沉积的高含盐软土而言,因其可溶盐含量较高,使得该类水泥土具有溶陷、盐胀、腐蚀等不良工程特性^[2-4]。在工程后期运营过程中,极易发生路基沉降、路面翻浆等病害,严重影响道路寿命,增加维护成本。为减少此类病害的发生,降低后期的维护成本,对高含盐水泥土的力学特性以及固化机理的研究十分必要,其可为后续沿海地区地基的设计施工提供理论依据。

水泥土作为水泥和原状土的拌合物,其力学特性必然受到水泥、原状土、水以及气候等因素的影响^[5]。目前,有关水泥土力学特性的研究已逐步展开。一些学者^[6-9]通过开展宏观层面的无侧限抗压强度试验,研究不同因素(诸如化学溶液的种类、浓度及pH值、偏高岭土含量、水泥掺入量、水灰比和外加剂等)对水泥土力学特性影响。另有部分学者^[10-12]通过扫描电镜(SEM)以及X射线衍射(XRD)等微观观测技术,研究含盐水泥土的劣化规律以及外加剂对水泥土劣化的抑制效应。现有研究虽对水泥土的力学特性及其影响因素进行了系统的研究,但是针对不同影响因素下高含盐水泥土力学特性的微观层面分析以及其固化机理的研究还较少^[13]。为弄清海相沉积的软土中高含量可溶盐对水泥土力学特性的影响以及其固化机理,本文以连云港海相沉积高含盐软土为例,通

过无侧限抗压强度测试,开展高含盐水泥土中 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 和 SO_4^{2-} 三种可溶盐离子对水泥固化土宏观力学特性影响及其变化规律的试验研究。同时,借助环境扫描电镜(ESEM)和X射线衍射仪(XRD)等微观测试技术及分析手段,研究可溶盐离子变化对高含盐水泥土的微观结构和化学组分的影响,从宏微观的角度分析高含盐水泥土的固化机理。

1 试验材料

1.1 高含盐软土

本次试验研究对象为江苏临海高速公路连云港灌云标段(LHGYX-LQ1~2)的海相沉积软土,取样深度约为地下3 m处。通过现场试验和室内常规试验,获得了连云港高含盐软土的物理性质和力学特性参数。连云港软土试验结果分别见表1和表2。

表 1 连云港软土的物理性质指标

Table 1 Physical properties of the Lianyungang soft soil

物理性质指标	平均值	范围值
含水率 $w/\%$	63.70	49.20 ~ 81.40
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.68	1.56 ~ 1.79
孔隙比 e	1.87	1.43 ~ 2.19
液限 $W_L/\%$	44.60	42.70 ~ 47.10
塑限 $W_p/\%$	24.50	22.80 ~ 26.20
液性指数 I_L	1.95	1.31 ~ 2.65
塑性指数 I_p	20.10	19.70 ~ 21.60

表 2 连云港软土的力学性质指标

Table 2 Mechanical properties of the Lianyungang soft soil

	压缩系数 $\alpha_{0.1-0.2}/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 E_s/MPa	抗剪强度		渗透系数	
			c/kPa	$\varphi/(\circ)$	$k_h/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$k_v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
平均值	2.01	1.48	7.50	8.60	2.74e-9	3.29e-9
范围值	1.03 ~ 2.74	1.16 ~ 2.35	6.10 ~ 11.30	7.40 ~ 9.90	1.43e-9 ~ 5.36e-9	1.40e-9 ~ 8.42e-9

取连云港软土进行化学分析,结果如表3所示,为便于对比研究,表3中同时给出了上海软土的分析结果。依据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[14]规定,连云港海相沉积软土属于亚氯盐渍土、强盐渍土和有机质土。与上海海相沉积软土相比,连云港软土的易溶盐离子 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 和 SO_4^{2-} 含量明显偏高,故研究重点为 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 和 SO_4^{2-} 含量对水泥土强度的影响。

表 3 连云港软土和上海软土化学分析结果^[7]

Table 3 Results of the chemical analysis of two different soft soils

测试项目	$Ca^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$Mg^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$Cl^{-}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$SO_4^{2-}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$HCO_3^{-}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	pH值	$CO_2/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
连云港软土	656	5 990	2 960	3 140	1 240	7.43	45.70
上海软土	263	0	2 128	79	963	7.74	150.80

1.2 硅酸盐水泥

试验采用普通硅酸盐水泥(P.O 32.5),基本特性如表4所示。

2 试验方案

本次试验共设计27组试验配比方案,开展不同离子类型和含量以及3种可溶盐离子共存对高含盐水泥土强度影响的试验,具体试验方案如表5所示。

依据水泥土作为高速公路路基填料、水泥土搅拌桩、高压旋喷注浆等加固技术中的水泥掺入比和实际水灰比,同时考虑使水泥、软土以及可溶盐离子更加充分的反应,借鉴相关文献的研究成果^[7, 10, 16-17],本次试验水泥掺入比为21%,水灰比为0.5。

表 4 普通硅酸盐水泥 (P.O 32.5) 的基本参数^[15]

Table 4 Basic properties of ordinary portl and cement (P.O 32.5)

类别	烧失量/%	MgO/%	SO ₃ /%	初凝时间/min	终凝时间/min	7 d抗压强度/MPa	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)
实测值	2.20	2.12	2.20	205	260	26.40	380

表 5 可溶性盐离子含量配比方案

Table 5 Experiment scheme of soluble salt ions

序号	Mg ²⁺ /(g·kg ⁻¹)	Cl ⁻ /(g·kg ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ /(g·kg ⁻¹)
1 [#]	2	0	0
2 [#]	4	0	0
3 [#]	6	0	0
4 [#]	8	0	0
5 [#]	10	0	0
6 [#]	0	1	0
7 [#]	0	2	0
8 [#]	0	3	0
9 [#]	0	4	0
10 [#]	0	5	0
11 [#]	0	0	1
12 [#]	0	0	2
13 [#]	0	0	3
14 [#]	0	0	4
15 [#]	0	0	5
16 [#]	2	1	1
17 [#]	2	3	5
18 [#]	2	5	5
19 [#]	6	1	3
20 [#]	6	3	5
21 [#]	6	5	1
22 [#]	10	1	5
23 [#]	10	3	1
24 [#]	10	5	3
25 [#]	0	0	0
26 [#]	6	3	3
27 [#]	10	5	5

配比前,将现场取回软土样进行处理。严格按照《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)的要求处理^[18]。首先,将土样风干、碾碎,过 2 mm 的标准筛;再将筛选后的土样浸水搅拌成泥浆,静置 48 h 使土颗粒沉淀,滤去清水,反复 3 次,洗去软土样自身可溶盐离子,得到“洗净土”。

按试验方案中试样的配比,称取一定量的“洗净土”、水泥、可溶盐以及蒸馏水。试验过程中,为避免可溶盐以晶体形式存在而与水泥土反应不充分,先将可溶盐和蒸馏水混合、充分搅拌使之成为可溶盐溶液;再将称好的“洗净土”和水泥拌和均匀;最后,将拌合物与可溶盐溶液加入微型搅拌机中拌和均匀,待制样用。

采用无侧限抗压试验研究可溶盐离子对水泥土

强度的影响。试块采用手工压注成型,将拌和均匀的水泥土用手工压注法置于 70.70 mm×70.70 mm×70.70 mm 的试模内,在振动台上充分振动,排出试块内部空气。待 24 h 后进行脱模,保存于塑料袋中,送入标准养护室($T=20\pm2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $RH=95\%$)内养护至指定时间。为探究可溶盐离子在不同时间下对水泥土无侧限抗压强度的影响,养护时间设置为 7, 14, 28, 60, 90, 180, 270, 360 d。

待试块养护至指定时间,立即开展无侧限抗压试验。本次试验采用华龙 WDW-600 型(产品规格: 600 kN; 精度等级: 0.50 级; 示值精度和变形测量精度: $\pm 0.50\%$)微机控制电子万能试验机测定水泥土试件的无侧限抗压强度。试验时将试块置于承压板的中部,加载速率控制在 1 mm/min。

试验结果取 3 个试块测试结果的平均值作为该组试块的无侧限抗压强度值。如单个试块测试值与平均值的差值超过平均值的 $\pm 15\%$ 时,该试块的测试值予以剔除,取余下 2 个试块测试结果的平均值作为该组试块的无侧限抗压强度值,如剔出后试块的测试值不足 2 个,则该组试验结果视为无效,重做至满足要求。

3 试验结果分析

3.1 单一离子不同含量对水泥土强度的影响

影响水泥土强度的可溶盐离子主要为 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 和 SO_4^{2-} ,且各离子在水泥土固化过程中发挥不同作用,为研究可溶盐离子对水泥土强度的影响特性,本次配比方案 1[#]~15[#]考虑单一离子含量的变化对水泥土强度的影响。通过不同离子类型及含量的配比和无侧限抗压试验,研究各龄期下,尤其长期条件下的高含盐水泥土强度特性及变化规律。图 1 为不同龄期下单一离子含量对水泥土无侧限抗压强度影响的试验结果。

从图 1 中可以看出,单一 Mg^{2+} 含量的增加导致水泥土的强度降低。随着龄期的增加,不同 Mg^{2+} 含量的试块抗压强度间的差异越明显。另外,随着龄期的增加,各组试块抗压强度逐渐增大。当龄期在 60 d 之前时,试块抗压强度随龄期增幅较大;当龄期在 60 d 之后,试块抗压强度随龄期增幅相对变缓。单一 Cl^{-} 含

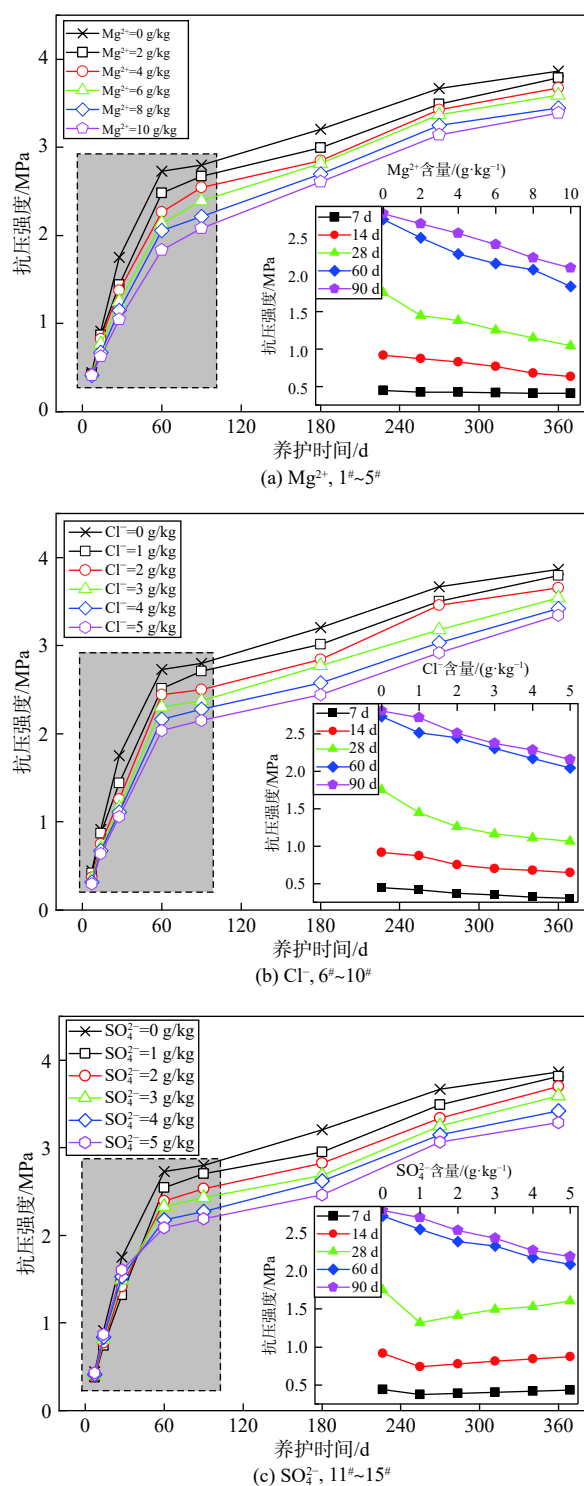


图1 不同离子含量条件下对水泥土抗压强度

Fig. 1 Influences of different ion contents on the cement-soil strength

量对试块抗压强度的影响与单一 Mg^{2+} 的影响基本一致。同时, 单一 SO_4^{2-} 含量对试块抗压强度的影响与单一 Mg^{2+} 和 Cl^- 的影响有所不同。当龄期在 60 d 之前时, 试块的抗压强度随 SO_4^{2-} 含量的增加呈现出先减小

而后逐渐增加的趋势, 这一趋势与单一 Mg^{2+} 和 Cl^- 的影响显著不同。而当龄期在 60 d 之后时, 试块的抗压强度随 SO_4^{2-} 含量的增加而减小, 这一趋势与单一 Mg^{2+} 和 Cl^- 的影响一致。

综上所述, Mg^{2+} 和 Cl^- 的含量对试块的抗压强度具有抑制作用, 随着 Mg^{2+} 和 Cl^- 的含量增加, 水泥土试块的抗压强度明显降低。对于单一 SO_4^{2-} 而言, 试块的早期抗压强度随 SO_4^{2-} 含量的增加呈现出先减小而后增加, 试块的中后期抗压强度随 SO_4^{2-} 含量的增加而减小。

3.2 3 种离子共存对水泥土强度的影响

连云港软土中 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的含量均相对较高, 研究 3 种可溶盐离子共存条件下试块的强度十分必要, 故本次开展 3 种离子共存条件下的试块无侧限抗压强度测试。图 2 为 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 共存条件下试块的抗压强度。从图 2 中可以看出, 当水泥土中不掺入任何离子时 (25[#]), 其强度比同龄期下掺入 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 试块的强度要高; 当同时掺入低含量的 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 时 (16[#]), 试块的无侧限抗压强度相应下降; 随着 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量同时增加 (26[#] 和 27[#]), 各龄期水泥土的无侧限抗压强度呈现出明显的下降趋势。 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 共存对水泥强度有较大的负作用, 且随着 3 种离子含量的增加, 试块的无侧限抗压强度下降显著。

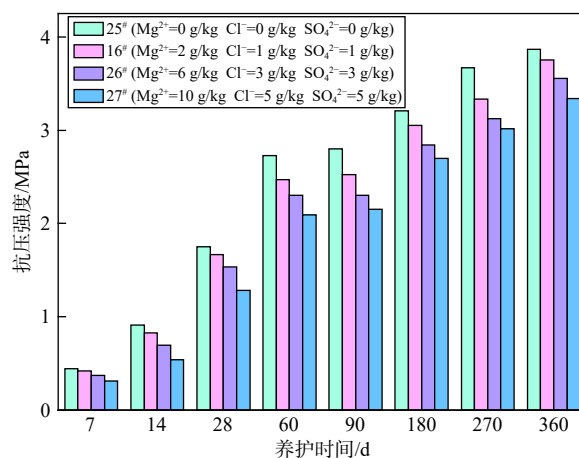


图2 3 种离子共存条件下试块的抗压强度

Fig. 2 Strength of the cement-soil samples under coexistence of three ions

Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 共存对水泥强度对试块抗压强度的增长有较强的抑制作用, 但 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量同时变化所导致的水泥土强度降低并不是单一可溶性盐离子作用的简单叠加, 在这一复杂的多离子浆土体系中, 各种离子之间存在一定交互作用。为研究 Mg^{2+} 、 Cl^-

和 SO_4^{2-} 对水泥土强度的影响程度,开展了这 3 种离子的正交试验($16^\# \sim 24^\#$),分析各离子对水泥土抗压强度的影响程度。试块抗压强度如表 6 所示。

为分析 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 对水泥土强度的影响程度,本次采用极差分析法和方差分析法相结合。极差的大小反映了试验中各因素对结果影响程度的大小,极差越大表明该因素影响程度越大。方差分析的基础是变差分解,即将总变差平方和分解为各因素效应变差平方和与误差效应平方和。首先假设各因素对

结果都有影响,且试验结果样本服从正态,然后考察各因素的效应平方和与误差效应平方和之比,比值服从 F 分布,比值越大对应概率越小,即为误差效应的概率越小,说明该因素对分析结果有影响假设成立的概率越大,即为该因素对分析结果影响大。

根据上述试验原理和试验方法,不同龄期条件下, Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的极差和方差如表 7 所示。通过各离子的极差和方差的计算结果,分析其对试块抗压强度的影响程度。

表 6 $16^\# \sim 24^\#$ 试块的抗压强度
Table 6 Strength of cement-soil samples $16^\#$ to $24^\#$ /MPa

编号	龄期/d							
	7	14	28	60	90	180	270	360
$16^\#$	0.42	0.77	1.35	1.91	2.66	2.49	3.03	3.91
$17^\#$	0.44	0.81	1.53	2.48	2.42	3.05	2.90	3.52
$18^\#$	0.39	0.63	1.59	2.60	2.83	2.72	3.11	3.62
$19^\#$	0.43	0.80	1.14	2.50	2.27	2.50	3.11	3.32
$20^\#$	0.43	0.88	1.63	2.74	2.30	2.48	3.21	3.66
$21^\#$	0.42	0.71	1.57	2.65	2.53	2.74	3.33	3.58
$22^\#$	0.39	0.80	1.63	1.93	2.57	2.06	3.18	3.61
$23^\#$	0.41	0.83	1.51	1.91	2.22	2.99	3.63	3.15
$24^\#$	0.35	0.81	1.46	2.38	2.69	2.83	3.77	3.61

表 7 不同龄期条件下 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的极差和方差计算结果
Table 7 Calculation results of the range and variance

龄期/d	极差			方差			影响程度
	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	
7	4.12e-2	3.55e-2	1.65e-2	2.72e-3	1.94e-3	4.44e-4	$\text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$
14	7.75e-2	1.21e-1	3.83e-2	1.01e-2	2.24e-2	2.82e-3	$\text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-}$
28	8.73e-2	1.87e-1	2.38e-1	1.14e-2	6.35e-2	8.57e-2	$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+}$
60	5.55e-1	4.26e-1	2.94e-1	4.64e-1	2.77e-1	1.59e-1	$\text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$
90	2.71e-1	3.63e-1	1.11e-1	1.10e-1	1.97e-1	2.15e-2	$\text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-}$
180	1.79e-1	4.86e-1	3.70e-1	5.09e-2	4.10e-1	2.41e-1	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+}$
270	5.10e-1	2.94e-1	1.59e-1	3.96e-1	1.29e-1	3.85e-2	$\text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$
360	2.28e-1	1.74e-1	1.44e-1	8.35e-2	5.66e-2	2.15e-2	$\text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$

从表 7 中可以看出,极差和方差分析结果有很好的相关性,能够较好地评价 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 共存对水泥土强度的影响程度。根据极差和方差结果可知, Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 不同程度地影响了试块的抗压强度。当养护时间较短时, Cl^- 对试块抗压强度的影响最大, Mg^{2+} 次之, SO_4^{2-} 最弱;而当养护时间较长时, Mg^{2+} 对试块抗压强度的影响最大, Cl^- 次之, SO_4^{2-} 最弱。

综上所述, Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 共存对水泥强度有较大的抑制作用,随着离子含量的增加,试块的强度表

现出显著下降的趋势。此外,随着养护时间的增加,不同可溶性盐离子对试块强度的影响程度不同;对试块早期强度影响最大的是 Cl^- , Mg^{2+} 次之, SO_4^{2-} 最弱;对试块中后期强度影响最大的是 Mg^{2+} , Cl^- 次之, SO_4^{2-} 最弱。

4 高含盐水泥土微观分析

可溶盐离子通过影响水泥土的水化和离子交换过程、改变水泥土空间结构分布来影响水泥土的力学

特性, 为了解可溶盐离子与水泥土的微观作用机理, 借助环境扫描电镜(ESEM)的手段, 分别研究单离子和多离子作用下水泥土的水化和离子交换过程中其微观结构空间分布特征。

本次共选取 5[#]、10[#]、15[#]、25[#]和 27[#]试块开展不同龄期(7, 28, 60, 90, 180, 360 d)下的 ESEM 分析和 X-射线衍射分析。由于文章篇幅限制, 本次选取养护 28 d 试块的 ESEM(图 3)和 XRD 分析结果进行分析(图 4)。

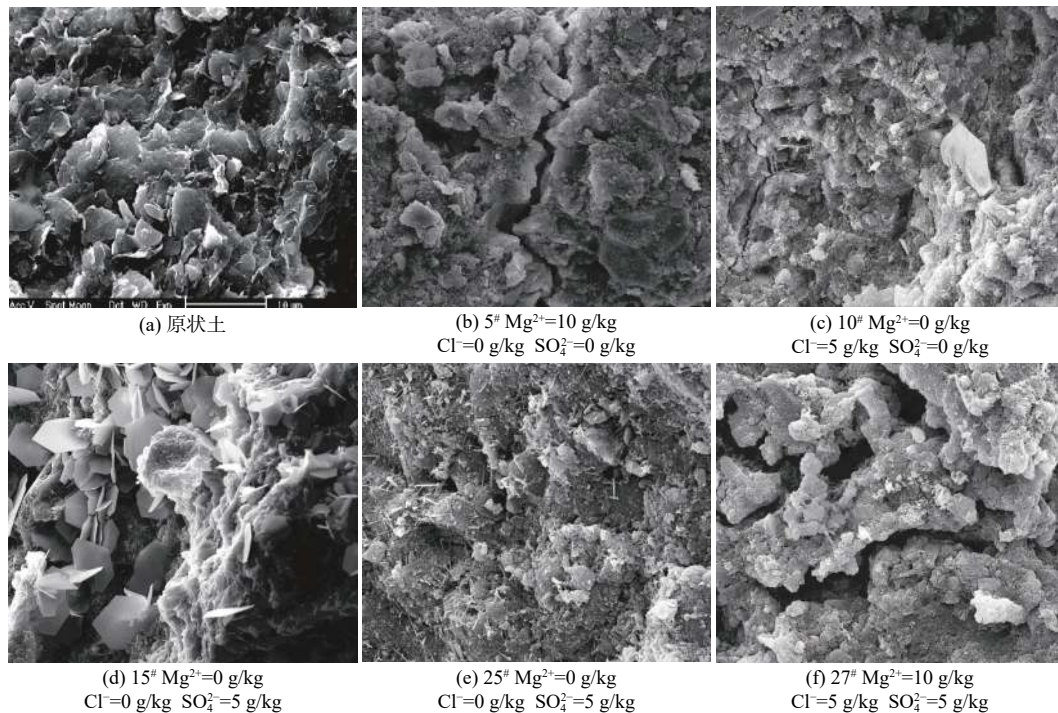


图 3 28 d 试块 ESEM 照片对比

Fig. 3 ESEM pictures of the cement-soils at 28 d curing ages

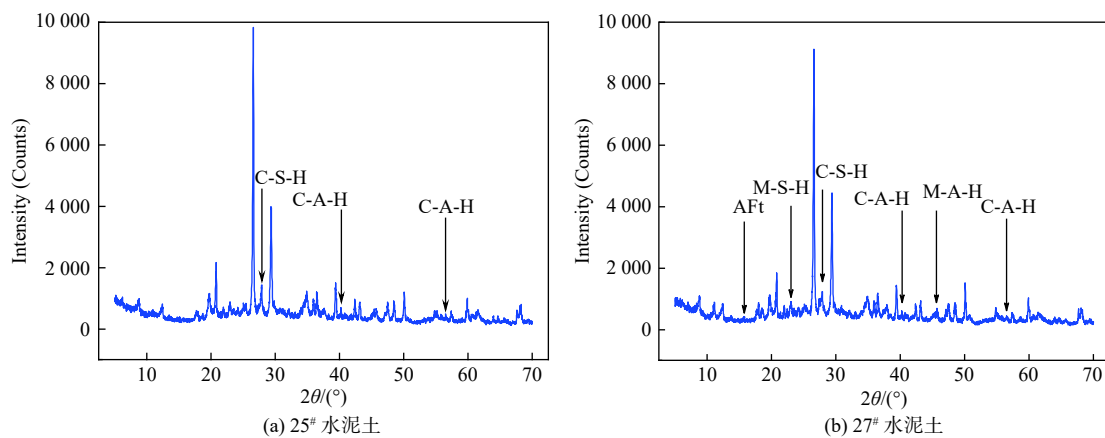


图 4 25[#]和 27[#]试块 XRD 图谱

Fig. 4 XRD pattern of cement-soil samples 25 and 27

从图 3 中可以看出, 原状土是由大量的片层状体排列成实体式基质结构, 少量粒状体分布在片层状基质中, 多为“边-面”和“边-边”的结合方式连结, 构成“黏土基质结构”。在不掺入任何可溶盐的水泥土中(25[#]), 片状的黏土矿物被絮(网)状和簇状物质粘结起来, 絮(网)状和簇状物质是水泥与软土混合后发

生水解和水化反应生成的水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)凝胶。此外, 在 28 d 龄期时试块表面有少量针棒状的钙矾石生成, 零星地分布于颗粒表面和粒间孔隙中。这些微晶物质含量的增多使土颗粒之间的联结类型从接触联结转变为胶结联结, 水泥土的孔隙变少, 水泥土变密实, 处理后的软土强度会有

较大的提高。

从仅掺入 Mg^{2+} 的试块(5[#])的 ESEM 照片中可以看出, 试块表面分布有少量的絮(网)状、簇状的 C-S-H 和 C-A-H 凝胶物, 且有较明显的孔隙和贯穿缝存在, 缝隙间无纤维状的水化产物或者针棒状的钙矾石生成。与 25[#]试块相比, Mg^{2+} 的掺入给水泥土的微观结构带来了较大的影响。

从仅掺入 Cl^- 的试块(10[#])的 ESEM 照片中可以看出, 试块表面同样分布有微量的絮(网)状、簇状的 C-S-H 和 C-A-H 凝胶物, 左右两侧存在 2 条贯穿缝, 试块的骨架构成疏松, 水化产物数量较少, 表面孔洞明显。

从仅掺入 SO_4^{2-} 的试块(15[#])的 ESEM 照片中可以看出, 试块表面具有絮状的 C-S-H 和 C-A-H 凝胶, 且可清楚地发现较多的六方片状、交叉排列的单硫型水化硫铝酸钙晶体(AFm)和针棒状的钙矾石晶体(AFt)分布。由于较多的钙矾石晶体的相互交织, 和黏土颗粒共同构造了试块的初期骨架, 这一现象有助于试块早期强度, 故呈现出试块早期强度随 SO_4^{2-} 含量增加而增加。

当同时掺入 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} (27[#])时, 在土-水-水泥-盐离子体系中, 黏土颗粒形态依然可见, 几乎无絮(网)状、簇状的 C-S-H、C-A-H 凝胶的生成, 仅有极少量的针棒状钙矾石晶体的分布, 颗粒之间的胶结不够充分, 试块中存在较大孔隙。由此可见, Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 共存对水泥土的微观组成特征有显著的影响, 使水泥土的结构强度性能明显降低。

从 25[#]和 27[#]试块的 XRD 图谱中也可以看出, 27[#]试块中 C-S-H 和 C-A-H 的峰值变弱, 而 M-S-H 和 M-A-H 出现明显的峰值, 但 M-S-H 与 M-A-H 的生成量较 C-S-H 和 C-A-H 要少, 其分散于 C-S-H 和 C-A-H 凝胶之中, 使得 C-S-H 和 C-A-H 的胶凝性变差, 从而降低水泥土的强度。

5 结论

(1) Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 对试块的强度有不同程度的负面影响。对于单一离子作用时, 试块的强度随着 Mg^{2+} 和 Cl^- 含量的增加而降低, 而试块的早期强度随 SO_4^{2-} 含量的增加先降低后增加, 中后期强度随 SO_4^{2-} 含量的增加而降低。对于多种离子共同作用时, 随着 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量的增加, 试块的强度表现出显著下降的趋势。

(2) 针对不同龄期的试块, 不同可溶性盐离子对试块强度的影响程度不同。对试块早期强度影响最大的是 Cl^- , Mg^{2+} 次之, SO_4^{2-} 最弱; 对试块中后期强度影响最大的是 Mg^{2+} , Cl^- 次之, SO_4^{2-} 最弱。

(3) 可溶性盐离子导致水泥土强度降低的原因在于, 可溶盐离子参与反应, 消耗水泥土中 C-S-H 和 C-A-H 凝胶, 并生成大量的 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结晶, M-S-H 和 M-A-H 分散于 C-S-H 和 C-A-H 凝胶中, 降低水泥土的胶结力, 结晶物质的生成一定程度上提高水泥土的强度, 而随着晶体膨胀到一定程度时, 膨胀力高于试块的胶结力, 进而导致微裂纹的产生, 水泥土的强度下降。

参考文献 (References) :

- [1] 李浩铭. 高含盐软土水泥固化强度特性研究及微观分析[D]. 上海: 同济大学, 2014. [LI Haoming. Strength and microstructure of salt-rich soft soil improved by cement [D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 杨晓明. 水泥处置高含盐量软土的微观试验和机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. [YANG Xiaoming. Microstructure and mechanism research on cement stabilized salt-rich clay[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.(in Chinese with English abstract)]
- [3] XIONG F, XING H F, LI H M. Experimental study on the effects of multiple corrosive ion coexistence on soil-cement characteristics[J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(2): 398 - 406.
- [4] 颜恩锋, 孙友宏, 许振华, 等. 深层水泥土搅拌桩在基坑支护中的应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊1): 90 - 93. [YAN Enfeng, SUN Youhong, XU Zhenhua, et al. Application of deep mixing cement-soil pile to foundation pit supporting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(Sup1): 90 - 93. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 黄新, 周国钧. 水泥加固土硬化机理初探[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(1): 62 - 68. [HUANG Xin, ZHOU Guojun. Hardening mechanism of cement-stabilized soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(1): 62 - 68. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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 Baokuang, CHEN Sili, 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

- with English abstract)]
- [7] XING H F, XIONG F, ZHOU F. Improvement for the strength of salt-rich soft soil reinforced by cement[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 36(1): 38 – 42.
- [8] 邢皓枫, 杨晓明, 徐超, 等. 水泥和添加剂对高含盐水泥土强度的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(8): 1062 – 1066. [XING Haofeng, YANG Xiaoming, XU Chao, et al. Effects of cement and additive on strength of soil-cement with high salt[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(8): 1062 – 1066. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 徐超, 李钊, 阳吉宝. 珊瑚礁砂水泥配比试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(5): 70 – 74. [XU Chao, LI Zhao, YANG Jibao. Research on mixing proportion test of cemented coral reef sand[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(5): 70 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘兴华, 韩晓猛, 徐超, 等. 海相软土对水泥土强度影响的机理研究[J]. *工业建筑*, 2009, 39(3): 64 – 68. [LIU Xinghua, HAN Xiaomeng, XU Chao, et al. Research on mechanism of effect of marine soft clay on cement-soil[J]. *Industrial Construction*, 2009, 39(3): 64 – 68. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 崔新壮, 张娜, 王聪, 等. 黄河三角洲改性含盐水泥土搅拌桩耐久性研究[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(3): 481 – 486. [CUI Xin Zhuang, ZHANG Na, WANG Cong, et al. Durability of salty soil-cement mixed pile in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(3): 481 – 486. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 徐菲, 蔡跃波, 钱文勋, 等. 脂肪族离子固化剂改性水泥土的机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(9): 1679 – 1687. [XU Fei, CAI Yuebo, QIAN Wenxun, et al. Mechanism of cemented soil modified by aliphatic ionic soil stabilizer[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(9): 1679 – 1687. (in Chinese with English abstract)]
- [13] XING H F, YANG X M, XU C, et al. Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement[J]. *Engineering Geology*, 2009, 103(1/2): 33 – 38.
- [14] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)]
- [15] PU S Y, ZHU Z D, WANG H R, et al. Mechanical characteristics and water stability of silt solidified by incorporating lime, lime and cement mixture, and SEU-2 binder[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 214: 111 – 120.
- [16] 梁仁旺, 张明, 白晓红. 水泥土的力学性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2001, 22(2): 211 – 213. [LIANG Renwang, ZHANG Ming, BAI Xiaohong. Analysis of laboratory test results of cemented soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(2): 211 – 213. (in Chinese with English abstract)]
- [17] HORPILBULSUK S, MIURA N, NAGARAJ T S. Clay –Water/Cement ratio identity for cement admixed soft clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(2): 187 – 192.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥土配合比设计规程: JGJ/T 233—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for mix proportion design of cement soil: JGJ/T 233—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)]

编辑: 张明霞