

DOI: 10.11779/CJGE2020S1013

海水侵蚀环境对钙质砂水泥土强度影响及微观结构研究

万志辉^{1, 2}, 戴国亮^{1, 2}, 龚维明^{1, 2}, 竺明星^{1, 2}, 高鲁超^{1, 2}

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土教育部重点实验室, 江苏南京 211189; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 211189)

摘要: 针对海洋环境下钙质砂水泥土复合地基的耐久性和长期安全稳定性问题, 利用海水作为侵蚀性介质对钙质砂水泥土进行室内浸泡试验, 通过对海水环境下水泥土试样开展微型贯入试验、电镜扫描、能谱测试以及 X 射线衍射试验, 分析了不同养护时间与不同水泥掺量对海水环境下钙质砂水泥土强度的影响规律以及微观结构特征。结果表明: 钙质砂水泥土侵蚀破坏深度随养护时间的增长逐渐增大, 随水泥掺量的增加逐渐减小, 且水泥掺量的增加能有效地抑制海水侵蚀性离子引起水泥土侵蚀破坏深度的发展; 与未侵蚀层相比, 侵蚀层的孔隙增加, Ca 含量降低, 且 Ca 的含量与水泥土的强度变化呈现出相似规律。在海水环境中, 水泥土的强度变化是增长和侵蚀破坏两种作用的共同结果, 在此过程中水泥土易发生 Ca 的溶出现象, 最终导致水泥土的强度降低。

关键词: 钙质砂; 水泥土; 海水侵蚀环境; 微型贯入试验; 微观结构

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0065-05

作者简介: 万志辉(1990—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事桩基础与深基础工程的研究。E-mail: zhihuiwan@seu.edu.cn。

Strength and microstructure of calcareous sand-cemented soil under seawater erosion environment

WAN Zhi-hui^{1, 2}, DAI Guo-liang^{1, 2}, GONG Wei-ming^{1, 2}, ZHU Ming-xing^{1, 2}, GAO Lu-chao^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Nanjing 211189, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Aiming at the durability and long-term stability problems of calcareous sand-cemented soil composite foundation in the marine environment, the seawater is used as the corrosive medium to perform an indoor soaking test on the calcareous sand cemented soil, and the micro cone penetration, scanning electron microscopy, energy dispersive spectrometer, and X-ray diffraction tests are conducted to analyze the strength and microstructure characteristics of calcareous sand cemented soil with different curing time and cement ratios under seawater environment. The results show that the erosion depth of calcareous sand-cemented soil gradually increases with the increase of curing time and gradually decreases with the increase of cement ratio, and the increase of cement ratio can effectively inhibit the erosion depth of cemented soil caused by seawater corrosive ions. Compared with those of the non-eroded layer, the porosities of microstructure are larger and the Ca contents are less in the eroded layer, and the Ca content and the strength of cemented soil show a similar rule. Under seawater environmental conditions, the strength change of cemented soil is the common result of the effects of growth and erosion. In this process, the cemented soil is prone to the phenomenon of Ca dissolution, which finally leads to the strength reduction of cemented soil.

Key words: calcareous sand; cemented soil; seawater erosion environment; micro cone penetration test; microstructure

0 引言

随着国家“一带一路”倡议中“海上丝绸之路”的实施, 珊瑚岛礁的工程建设中大跨度、大体量的建(构)筑物不断涌现。然而, 岛礁上的钙质砂具有多孔隙、易破碎、地基承载力较低等特性^[1], 造成其岩土工程性质有别于陆源其他土层, 不利于直接在工程中应用, 需采用相应的方法或技术措施来改善钙质砂的不良力学性质。

目前常用的方法主要是利用水泥浆液或其他化学

浆液作为固化剂来达到改善地基土力学性质, 国内外已有学者开展了水泥浆液加固钙质砂的相关研究。Ghazali 等^[2]介绍了红海地区钙质沉积物的基础注浆施工工艺及其现场静载试验, 结果表明在该地层采用水泥浆液对基础加固可取得很好效果; 房靖超等^[3]通

基金项目: 国家自然科学基金项目(32008100, 51878160); 国家重点研发计划专项资助项目(2017YFC0703408); 江苏省六大人才高峰项目(XNY-047)

收稿日期: 2020-06-04

过研制的注浆装置对珊瑚砂进行了注浆加固模拟试验, 注浆后珊瑚砂能达到较好的固化作用。但由于钙质砂处于复杂海洋环境, 其地下承压水常常与具有侵蚀性的海水相连, 造成水泥浆液加固钙质砂所形成的钙质砂水泥土长期处于海水浸泡。而海水侵蚀会改变水泥土的微观结构, 导致其力学性能劣化, 影响工程长期安全稳定性。目前对海水侵蚀环境下钙质砂水泥土强度变化的研究还未见报道, 因此探索海水侵蚀环境下钙质砂水泥土的强度变化规律, 对保障珊瑚岛礁工程安全具有重要的意义。

针对海水环境下水泥土侵蚀破坏问题, 国内外许多学者采用水泥土经标准养护、脱模后海水整体浸泡并利用无侧限抗压试验的研究思路, 开展以海水为介质的水泥土侵蚀试验^[4-5]。然而, 海水环境下钙质砂水泥土自形成起即受到侵蚀性离子的溶蚀, 因此研究该类问题的关键是不经养护直接将制备的水泥土与海水环境接触。基于此, 杨俊杰等^[6]研究了一种能模拟水泥土形成环境的养护装置, 将制备好的试样不经脱膜直接放入海水环境养护, 且仅允许试样顶面的水泥土与海水接触。因此, 本文采用将钙质砂水泥土不经标准养护、不脱模直接与海水环境接触的方法, 开展不同养护时间、不同水泥掺量的水泥土室内侵蚀试验, 在此试验基础上, 结合扫描电子显微镜 (SEM)、能谱 (EDS) 测试及 X 射线衍射 (XRD) 试验系统地研究海水侵蚀环境下钙质砂水泥土强度的分布规律, 以期为评价钙质砂水泥土复合地基的耐久性和长期安全稳定性提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试验材料

本次试验用砂选用了中国南沙群岛附近海域的钙质砂, 属于未胶结松散珊瑚碎屑沉积物, 根据筛分选取相对稳定的粒组 0.5~0.25 mm 作为试验用砂。通过 X 射线荧光 (XRF) 光谱检测分析结果可知, 钙质砂中的主量元素为 Ca, 含量为 50.92%。试验采用 42.5 号普通硅酸盐水泥作为固化剂。试验所用的海水取自东海海域, 海水的主要离子成分有 Cl⁻、SO₄²⁻、Mg²⁺、Ca²⁺, 离子浓度分别为 15680, 4920, 1068, 345 mg/L。

1.2 试验装置

试验养护装置包含耐腐蚀的塑料材质的试样筒、养护筒。考虑试样制备的大小、海水使用量以及边界条件等问题, 试样筒内部直径为 100 mm, 高度为 100 mm, 侧面及底面封闭不透水, 顶面敞开。养护筒采用顶面直径为 180 mm, 底面直径为 140 mm, 高度为 160 mm 的塑料桶。为了保证钙质砂水泥土样的均匀性, 减小试验的离散性, 制样过程中通过水泥土搅拌

装置将配制好的水泥浆液与钙质砂充分搅拌均匀, 然后将水泥土装入试样筒, 振捣刮平。

本次试验使用的微型贯入仪 (MCPT-1) 来自中国海洋大学环境科学与工程学院, 其最大贯入深度为 150 mm, 探杆直径为 2 mm, 探头直径为 3 mm, 锥角为 60°, 并且探杆和探头为不锈钢材料^[7]。

1.3 试验方法

为反映实际工程中形成的钙质砂水泥土, 在制作试样前需配制水泥浆液, 浆液水灰比控制为 0.6。将水泥掺量分别为 5%, 10%, 15%, 20% 的水泥浆液加入含水率为 24.76% 的钙质砂样中, 通过水泥土搅拌装置搅拌后完成制样。需要注意的是, 在制样过程中尽可能避免混入空气, 制样时间控制在 10 min 之内完成, 以防止水泥土发生水化等反应而凝结。将制备好的水泥土试样放入装有海水的养护筒中, 海水高出水泥土顶面 1~2 cm, 并采用保鲜膜将养护筒密封。考虑水泥土强度受海水侵蚀环境的影响, 将试验的养护浸泡时间设计为 7, 28, 60, 90 d。需要说明的是, 海水养护浸泡过程中前 28 d 每隔 7 d 换一次, 28 d 后每隔 30 d 换一次。

针对达到养护时间的试样, 不脱模直接实施微型贯入试验, 为优化制样的数量与减小数据的离散性, 对同一试样实施 3 次微型贯入试验。由于探头直径为 3 mm, 试样筒内径为 100 mm, 因此贯入点之间的距离与贯入点至筒壁距离均设置为 31.7 mm, 约为探头直径的 10.6 倍, 根据文献[7]的结论可认为本次试验设置贯入点的位置可消除边界效应对试验结果的影响。

在完成微型贯入试验后, 将试样脱模并以水泥土顶面为基线自上而下按 5 mm 厚度分层切片, 结合微型贯入试验结果, 选取代表性层厚 0~5 mm、10~15 mm 的试样开展 SEM、EDS 及 XRD 分析。为保证扫描得到的微观结构图像能反映试样的真实状态, 应尽可能选用未扰动的试样作为测试样品, 使试样保持其原有状态且具有良好的导电性。本次试验采用 Quanta 250 扫描电子显微镜。为便于试样间的对比, 对每个样品采用 1000 倍和 4000 倍扫描成像。为了识别试样的主要组分, 采用 Genesis Apollo X 能谱仪辅以能谱分析。观测时在低倍数下选定测试位置, 通过从大到小的放大倍数进行连续扫描成像, 从而可避免重复调焦, 提高观测效率。本次 XRD 试验采用 D8 Advance X 射线衍射分析仪, 并利用 JADE 6.5 软件对钙质砂水泥土的物相进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 微型贯入试验结果与分析

图 1 为不同水泥掺量的钙质砂水泥土在不同养护

时间的贯入阻力与贯入深度的关系曲线。由图 1 可知, 不同养护时间的贯入阻力 - 贯入深度关系曲线具有相同的变化趋势, 并且贯入阻力 - 贯入深度曲线的变化特性反映了钙质砂水泥土强度的变化。在试样的表层贯入阻力接近于零, 不同条件下试样浅层贯入阻力为零的区域范围有所不同, 随着养护时间的增加与水泥掺量的减小该区域范围呈增大趋势; 随着贯入深度的增加, 水泥土试样的强度开始逐渐发挥作用, 贯入阻力随着贯入深度的增加而增大, 且养护时间越长与水泥掺量越大时贯入阻力随着贯入深度呈近似线性增长; 当达到一定深度后, 水泥土试样的强度随着深度的增加而逐渐趋于一稳定值。因此, 根据贯入阻力 - 贯入深度曲线的变化特性, 可大致分为强度缓慢增长段、强度线性增长段和强度稳定段三个阶段。其中, 强度缓慢增长段水泥土的强度较低, 直接与海水环境接触易对其表层造成侵蚀破坏, 且侵蚀破坏深度随着养护浸泡时间的增长而增加; 强度线性增长段随着养护时间的增长其线性长度逐渐增加, 表明水泥土试样内部的强度仍在增强。由此可见, 水泥土的强度随着深度的变化大体呈增加的趋势, 海水环境中的侵蚀性物质会影响水泥土的强度, 并发生由浅入深的侵蚀破坏现象, 也表明水泥土浸泡侵蚀后会形成非均质体。

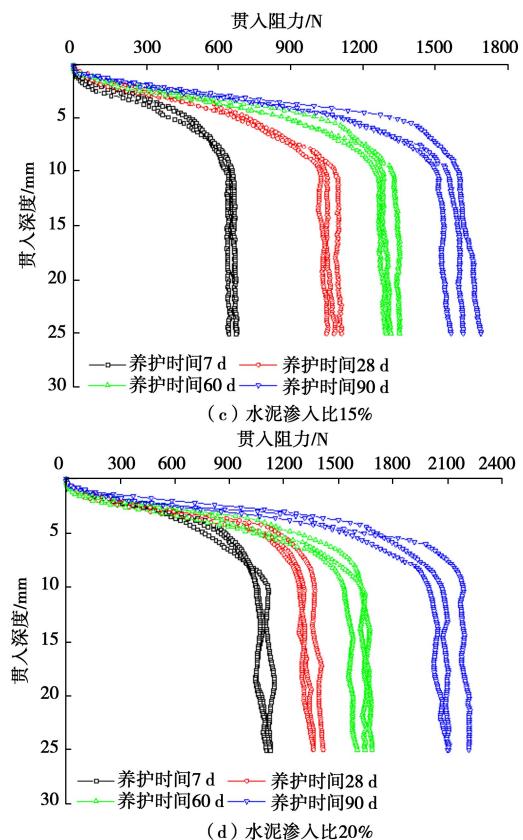
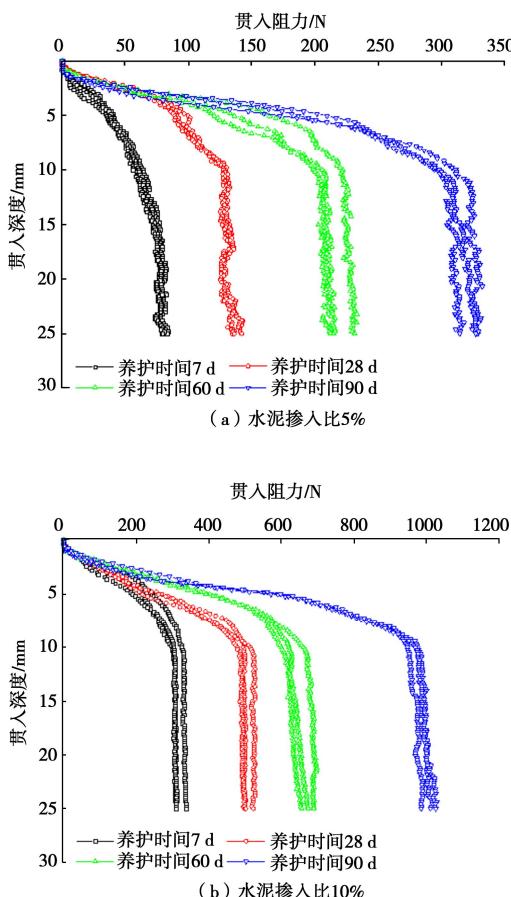


图 1 钙质砂水泥土的贯入阻力 - 贯入深度曲线

Fig. 1 Penetration resistance-penetration depth curves of calcareous sand-cemented soil

为了描述海水环境下水泥土未受侵蚀破坏的深层强度变化规律, 将试样深度 15~25 mm 的平均贯入阻力称为深层平均贯入阻力, 因此可以得到不同水泥掺量下养护时间与深层平均贯入阻力的关系曲线如图 2 所示。需要说明的是, 深层平均贯入阻力是对每个试样的 3 次贯入试验数据求均值, 并将试样深度 15~25 mm 贯入阻力求均值给出的。

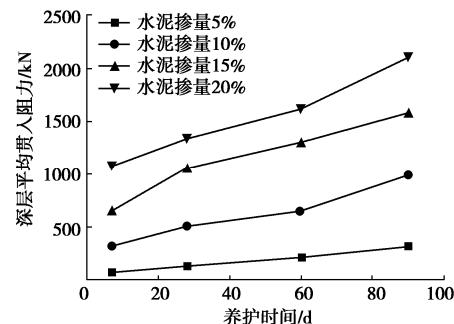


图 2 养护时间对深层平均贯入阻力的影响

Fig. 2 Influences of curing time on average penetration resistance of cemented soil in deep layer

图 2 所示, 钙质砂水泥土在深层位置的强度随养护时间增长呈现出线性增长趋势, 且深层平均贯入阻力增加的斜率随着水泥掺量的增加而增大。水泥掺量较少时深层平均贯入阻力的增长在较短的养护时间内

趋于稳定，而水泥掺量越大，深层平均贯入阻力的增长所需的养护时间越长。对于不同水泥掺量的钙质砂水泥土，当养护时间达到90d时其强度分别约为养护60d强度的1.2~1.5倍、养护28d强度的1.5~2.4倍。由此可见，海水环境下钙质砂水泥土的深层平均贯入阻力随着时间的推移而不断增长，但增长的趋势逐渐变缓且最终趋于稳定。

此外，水泥掺量对水泥土未受侵蚀破坏深层强度的影响更为明显，水泥掺量的大小对水泥土的固化进程有着较大的影响，水泥掺量在5%~20%的范围内数值越大则水泥土的强度表现越大，对侵蚀环境的抵抗能力就越强，其侵蚀破坏的程度也就越低。可见，在实际工程中水泥掺量的增加不仅可以增强水泥土的强度，还能降低海水环境下侵蚀破坏的程度。

2.2 SEM试验结果与能谱分析

图3为水泥掺量20%的水泥土养护90d后的微观结构图像。

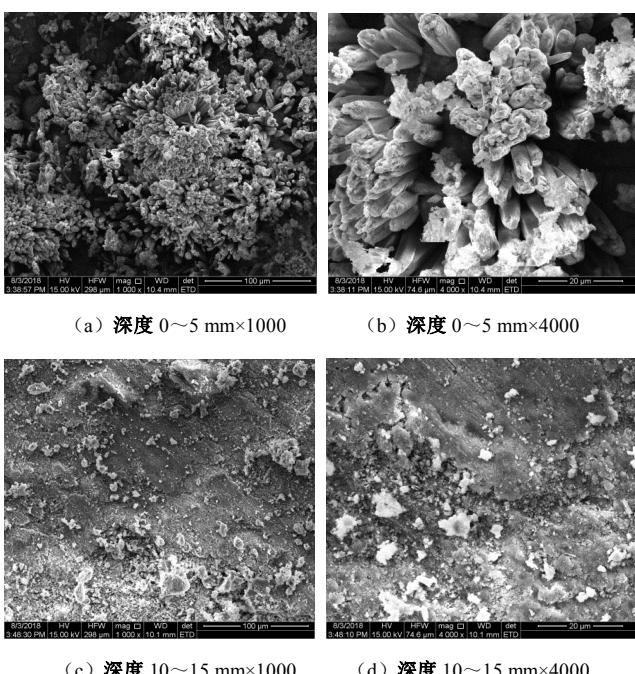


图3 水泥掺量20%养护90 d不同深度的微观结构

Fig. 3 Microstructures of cemented soil cured 90 d with cement ratio of 20% at different depths

由图3可知，试样侵蚀层（深度0~5 mm）与未侵蚀层（深度10~15 mm）的微观结构存在一定的差异。对于未侵蚀层，纤维状的水泥水化产物发育显著，相互联结并填充砂颗粒间的孔隙，使砂颗粒、水泥与水化产物的形态难以分辨，从而联结成具有较高强度的整体。对于侵蚀层，其砂颗粒间也出现了水泥水化产物，但与未侵蚀层相比，其颗粒间的孔隙结构明显，且产生了大量细长的针棒状晶体（钙矾石），孔隙增多表明侵蚀反应对水泥土的削弱作用具有显著影响。该

结果与微型贯入试验得到的侵蚀深度随养护浸泡时间的增长逐渐增加的结果相一致，进一步反映了微型贯入试验结果的有效性。因此，海水侵蚀环境下水泥土的强度变化是由水化反应用于水泥土强度的增强作用和侵蚀反应用于水泥土强度的削弱作用共同决定的。

通过能谱分析仪对钙质砂水泥土试样进行能谱测试，其测试结果见图4。从图4可以看出，水泥土试样主要含有钙、硅、氧、钾、钠、镁、铝、铁、硫、氯等元素。经海水侵蚀环境养护后，未侵蚀层的Ca含量要高于侵蚀层，Ca的含量与水泥土强度的分布具有相似规律，这表明海洋环境下水泥土表层易发生Ca的溶出现象，而Ca含量的降低会导致强度的降低。

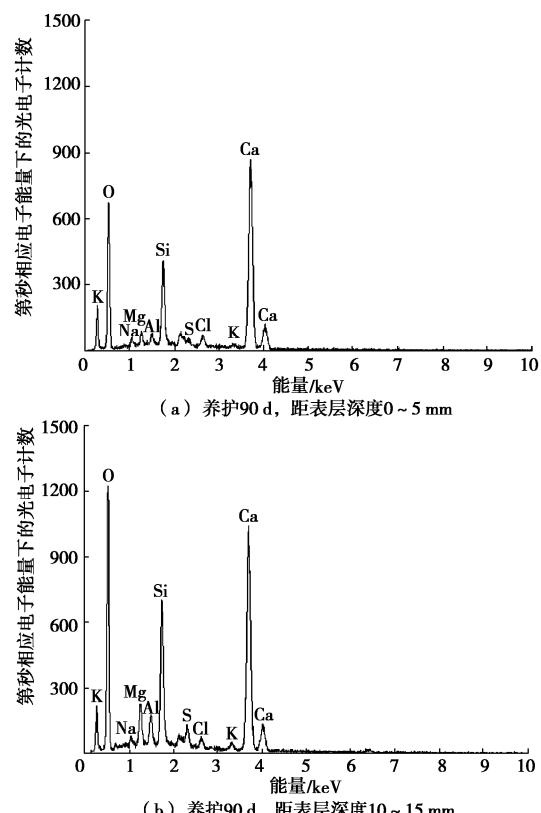


图4 水泥掺量20%养护90 d的水泥土能谱图

Fig. 4 Energy spectrum diagrams of cemented soil cured 90 d with cement ratio of 20%

2.3 XRD物相分析

对水泥掺量20%的水泥土养护90d不同深度的2个样品进行XRD物相分析，根据试样的实际成分，通过衍射线的高度可推断出试样可能的物相，其结果如图5所示。

由图5可知，钙质砂水泥土试样中存在氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)、水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝酸钙(C-A-H)、方解石(CaCO_3)、水镁石($\text{Mg}(\text{OH})_2$)、水化硅酸镁(M-S-H)、水化铝酸镁(M-A-H)、钙矾石(Aft)、水化氯铝酸钙($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)等

化合物。水化产物的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C-S-H 、 C-A-S-H 的衍射峰高度随着水泥土深度的增加而增强, 而侵蚀层的水化产物相对较少, 这说明侵蚀性离子对水化产物具有分解作用, 并生成水化硅酸镁 (M-S-H)、水化铝酸镁 (M-A-H) 等胶凝性较差的产物, 导致水泥土的强度降低; 而 M-S-H 、 M-A-H 等物质随着深度的增加表现出减小的趋势。可见, 在海水环境下水泥土会发生由浅入深的侵蚀破坏。

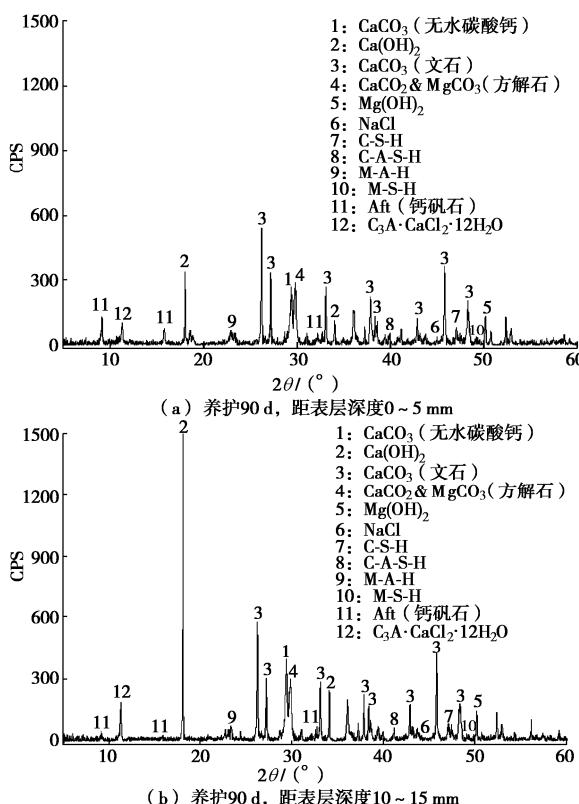


图 5 钙质砂水泥土试样的 X 射线衍射图

Fig. 5 X-ray diffractions of calcareous sand-cemented soil samples

3 结 论

(1) 通过微型贯入试验可评价海水侵蚀环境下水泥土强度的分布规律, 贯入阻力随着贯入深度和水泥掺量的增大而增加, 而深层贯入阻力随养护时间呈现出线性增长趋势。

(2) 在海水环境中, 水泥土强度同时存在增长和侵蚀破坏两种作用, 侵蚀深度随养护时间的增长和水泥掺量的减小而增加, 而水泥掺量的增加能有效地抑制海水侵蚀性离子引起水泥土侵蚀破坏深度的发展。

(3) 钙质砂水泥土未侵蚀层的微观结构中存在较多的纤维状水化产物, 结构致密, 砂颗粒间的整体联结性较强; 而侵蚀层的孔隙结构明显, 呈现出大量细长的针棒状钙矾石晶体。侵蚀层的 Ca 含量要明显低

于未侵蚀层, 说明海水环境下水泥土发生了 Ca 的溶出现象。

(4) 水泥土侵蚀层的水化产物的衍射峰强度相对较弱, 随着水泥土深度的增加, 水化产物的衍射峰强度呈现增强的趋势, 主要是由于海水中侵蚀性离子对水化产物具有分解或抑制作用, 生成 M-S-H 、 M-A-H 等胶凝性较差的产物, 从而导致水泥土的强度降低。

参考文献:

- [1] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. Géotechnique, 1990, **40**(4): 607–626.
- [2] GHAZALI F M, SOTIROPOULOS E, MANSOUR O A. Large-diameter bored and grouted piles in marine sediments of the Red Sea[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, **25**(4): 826 – 831.
- [3] 房靖超, 陈涛, 何岩东, 等. 珊瑚砂层注浆的固化技术研究[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2016, **34**(3): 264 – 269. (FANG Jing-chao, CHEN Tao, HE Yan-dong, et al. Solidification technology of coral sand[J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2016, **34**(3): 264 – 269. (in Chinese))
- [4] HARA H, HAYASHI S, SUETSUGU D, et al. Study on the property changes of lime-treated soil under sea water[J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu C/JSCe Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **66**(1): 21 – 30.
- [5] 刘泉声, 屈家旺, 柳志平, 等. 侵蚀影响下水泥土的力学性质试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(12): 3377 – 3384. (LIU Quan-sheng, QU Jia-wang, LIU Zhi-ping, et al. Experimental study of mechanical properties of cemented soil under corrosion influence[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(12): 3377 – 3384. (in Chinese))
- [6] 杨俊杰, 孙涛, 张玥宸, 等. 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, et al. Deterioration of soil cement stabilized in corrosive site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(1): 130 – 138. (in Chinese))
- [7] 闫楠. 滨海相软土地形成的水泥土强度衰减过程研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015. (YAN Nan. Research on Strength Deterioration Process of Cement Soil in Site of Marine Soft Soil[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. (in Chinese))