

# 腐蚀性场地形成的水泥土的劣化研究

杨俊杰<sup>1, 2</sup>, 孙涛<sup>1, 2, 3</sup>, 张玥宸<sup>1, 2</sup>, 苗佳丽<sup>4</sup>

(1. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100;  
3. 青岛市勘察测绘研究院, 山东 青岛 266032; 4. 九州大学工学部地盤工学研究室, 日本 福岡 819-0395)

**摘要:** 水泥土等加固体的劣化可以分为场地环境变化引起已有加固体的劣化问题和在腐蚀性场地形成的加固体的劣化问题。前一个问题是在加固体形成一段时间后因外界环境变化而受到侵蚀的问题; 后者是在腐蚀性环境中产生强度的同时发生劣化的问题。为了研究加固体在腐蚀性场地的劣化问题, 开发了一种能够近似模拟加固体形成环境的养护装置。在试样筒中制备加固体后立即将加固体连同试样筒置于养护筒, 并只允许加固体顶面与腐蚀性环境接触, 达到一定龄期后实施微型贯入试验及化学成分分析试验, 初步研究了海水及其压力对滨海沉积软土地形成的水泥土劣化的影响。结果表明: 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; 劣化的发生与  $\text{Ca}^{2+}$  的溶出有关,  $\text{Ca}^{2+}$  浓度随水泥土深度的变化趋势呈现一定的规律性。

**关键词:** 水泥土; 海相黏土; 劣化;  $\text{Ca}^{2+}$ ; 海水环境; 微型贯入试验

**中图分类号:** TD853.34      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2012)01-0130-09

**作者简介:** 杨俊杰(1962-), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程专业的教学与科研工作。E-mail: jjyang@ouc.edu.cn。

## Deterioration of soil cement stabilized in corrosive site

YANG Jun-jie<sup>1, 2</sup>, SUN Tao<sup>1, 2, 3</sup>, ZHANG Yue-chen<sup>1, 2</sup>, MIAO Jia-li<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Qingdao Geotechnical Investigation and Surveying Research Institute, Qingdao 266032, China; 4. Department of Civil Engineering, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan)

**Abstract:** The cement stabilized soil in natural condition, as well as stabilization in corrosive site, will be influenced by environmental pollution such as acid rain, seawater invasion or industrial pollution, which will lead to deterioration of the structure. Especially in the corrosive site, the strength of soil stabilized by cement will increase, but at the same time, it will decrease due to the deterioration at the beginning of stabilization. The experimental work is performed to study the strength of soil stabilized by cement in the corrosive site which is represented by sea water. Laboratory tests are carried out to measure the strength distribution by means of the micro cone penetration tests. Also, the element analysis tests using the ion chromatography to measure the distribution of  $\text{Ca}^{2+}$  within the specimen are conducted. The effect of seawater pressure on the strength of cement stabilized marine clay is analyzed. Two conditions are prepared. In the first condition, two meters of seawater pressure are applied to the specimen by using vertical pipe filled by seawater, and the other specimen has no pressure applied. It is indicated that the deterioration extends quickly under seawater environment and the deteriorated depth becomes deeper with the increase of pressure. The element analysis shows that the concentration of calcium ions in deteriorated portion is lower than that in non deteriorated portion.

**Key words:** cement stabilized soil; marine clay; deterioration; calcium ion; seawater environment; micro cone penetration test

## 0 引言

水泥土或灰土等加固体不仅应用广泛, 可作为竖向承载的复合地基、基坑工程中的挡墙或防渗止水帷幕、路基或堤基工程中的大体积稳定土等<sup>[1-12]</sup>, 而且工程量巨大。长期处在腐蚀性场地中的加固体, 与混凝土、钢材等建筑材料一样不可避免地受到腐蚀, 会

发生强度降低、渗透性增大的劣化现象。劣化的发生严重影响加固体的使用寿命<sup>[4, 13-16]</sup>。

工业、农业及生活等污染源产生的酸、碱、煤焦油、灌溉水、垃圾渗滤液等致污物质及海水侵入<sup>[17-18]</sup>、

潮汐、酸雨<sup>[19]</sup>导致场地环境变化的问题时有发生<sup>[20]</sup>。一方面, 被污染场地中侵蚀性离子导致已有加固体的性能发生劣化。另一方面, 在已经被污染的场地或海水湿排粉煤灰荒场<sup>[21-22]</sup>、垃圾填埋场(如在建青岛北客站工程)、滨海沉积软土、滨海相吹填土等具有腐蚀性的场地施工的加固体同样存在劣化问题。例如, 日本发现约 20 a 前在海水潮汐作用区竣工的河川堤防的大体积浅层灰土地基部位有软化和泥化现象<sup>[13]</sup>。堤基由河川疏浚泥及现场土以 30~40 kg/m<sup>3</sup> 的比例添加生石灰混合而成。距离河口越近, 发生漏水的地方越多, 石灰稳定土的软化现象越严重。石灰稳定土的软化不仅是漏水问题, 且是降低堤坝稳定性的诱因<sup>[14]</sup>。Ikegami 等的调查研究显示, 某大体积水泥固化土 20 a 后的劣化深度达到了 30~50 mm<sup>[4, 15]</sup>。采用 DJM (粉体喷射搅拌法) 施工的水泥土桩在 17 a 后同样发现了表层强度衰减现象<sup>[4, 23]</sup>。

如上所述, 有关水泥土等加固体劣化问题可以分为两类: ①场地环境变化引起已有加固体的劣化问题; ②在腐蚀性场地形成的加固体的劣化问题。相对于加固体强度机理研究, 属于前者的加固体劣化方面的研究报告较少, 其劣化过程也有待进一步阐明, 而真正意义上属于后者的加固体劣化研究尚未见相关报告。研究在腐蚀性场地形成的加固体的劣化问题具有一定的理论和实际工程意义。

加固体的劣化研究应该包括加固体强度降低和渗透性增大的规律性研究与相应的劣化过程(劣化机理与时间的关系)研究, 以及抗劣化措施研究(如抗劣化外加剂研制)等内容。目前尚未有劣化水泥土的渗透性研究报告。本文主要针对加固体劣化引起的强度降低问题, 在分析水泥土等加固体劣化研究思路的基础上, 依次介绍在腐蚀性场地形成的加固体的劣化研究方法、开发的养护装置与微型贯入仪及初步的试验结果。

## 1 水泥土等加固体劣化研究思路

以下分别分析上述两类劣化问题的研究思路。有关冻融循环引起的加固体劣化研究可参看相关文献。

### 1.1 场地环境变化引起的加固体劣化研究思路

场地环境变化引起的加固体劣化, 主要是指酸、碱、海水等致污物质侵入场地导致场地土质及土中水被污染, 场地内既有加固体受到致污物质及被污染水、土的腐蚀而发生的劣化。

目前, 国内外的加固体劣化研究均属于这一类<sup>[14, 24-39]</sup>, 其主要研究内容是原土性质、固化剂种类与添加量、养护时间、腐蚀性环境及加固体在其中的时

间等各种因素对加固体强度的影响与影响机理。

国内学者采用的研究方法及技术路线基本上是制备加固体→养护→(脱模)加固体整体浸泡→无侧限抗压强度试验及物理化学试验<sup>[24-34]</sup>。多数研究结果表明, 同一种侵蚀性离子, 浓度越高、侵蚀时间越长, 同一种加固体强度降低的幅度越大。劣化过程与一系列的矿物成分、化学反应、生成物质及其量、生成物质导致水泥土产生裂隙、离子溶出使水泥土出现孔洞等有关<sup>[40-43]</sup>。

实际上, 经侵蚀性离子溶液整体浸泡后的加固体, 是浅层与深层强度不等的非均质试样, 所以, 无侧限抗压强度试验得到的浸泡后加固体强度是平均强度。而劣化深度与劣化快慢不因试样大小而变, 因此, 无侧限抗压强度试验测得的强度降低幅度与试样尺寸有关, 试样越大强度降低幅度越小。采用无侧限抗压强度试验评价水泥土劣化程度的方法不尽合理。

Hara 等<sup>[14]</sup>、Kitazume 等<sup>[35]</sup>采用的研究方法及技术路线是制备加固体→养护→(脱模、橡皮膜罩住圆柱形加固体顶面以外部分)浸泡→微型贯入试验及物理化学试验。采用微型贯入试验, 可以根据贯入阻力在水泥土试样深度方向的变化得到劣化深度, 不同浸沦时间的水泥土试样的劣化深度显示了强度(劣化)的时空分布情况。而且贯入阻力与无侧限抗压强度呈线性关系, 这种关系可以将贯入阻力换算为无侧限抗压强度<sup>[35]</sup>。其中 Hara 等的主要研究结果表明, 灰土劣化是从与海水接触面开始依次向深部发展的; 与海水接触时间越长、海水浓度越高, 悬液的 pH 值降低幅度越大、灰土的 Ca<sup>2+</sup>溶出量越大, 相应地 Mg<sup>2+</sup>增加、劣化深度也越深。Saitoh 等<sup>[4]</sup>、Ikegami 等<sup>[15]</sup>、Hayashi 等<sup>[23]</sup>、Terashi 等<sup>[37]</sup>的室内试验和现场测试也表明水泥土发生了 Ca<sup>2+</sup>淋溶现象, 其实质是加固体的水泥水化产物溶解, Ca<sup>2+</sup>从加固体中扩散到其周围环境, 导致加固体表层劣化, 同时其孔隙率增加<sup>[4]</sup>。

### 1.2 在腐蚀性场地形成的加固体的劣化问题及劣化影响因素

有关原土的腐蚀性对加固体强度及加固机理的影响等研究<sup>[44-58]</sup>, 其一般的研究方法及技术路线是, 制备加固体→养护→(脱模)无侧限抗压强度试验及物理化学试验, 因为在养护的过程中或养护后没有加固体外界腐蚀环境的介入, 可以认为不属于加固体劣化研究的范畴, 在此不赘述。

在腐蚀性场地形成的加固体的劣化, 主要是指在被酸、碱、海水等致污物质污染的场地或滨海相软土等具有腐蚀性的场地施工的加固体在产生强度的同时, 受场地中侵蚀性离子影响而发生的劣化。

影响加固体劣化的因素有内因和外因,内因是影响加固体强度的因素,有原土性质、固化剂种类与强度等级及掺入比、水灰比、加固体自重应力状态、施工工艺等;外因是外界环境因素,有侵蚀性离子种类及浓度、温度及温度循环变化、加固体受到的有效土压力和孔隙水压力(如饱和地基中水泥土桩侧面承受的水平向有效土压力和孔隙水压力)等;而时间这一因素可以看成是内因也可以看成是外因,从水泥土强度增长的角度,可以称为龄期,从劣化的角度看,则表示水泥土与侵蚀性介质接触的时间长短,是水泥土强度降低的因素,研究腐蚀性场地形成的加固体的劣化,应在加固体形成后立即将其置于腐蚀性环境中养护,因此,可以将这两个时间因素看成是同一个,考虑到可将水泥土视为是在腐蚀性环境中养护,亦为方便起见,称之为养护时间。

土田孝等<sup>[38-39]</sup>将尚未凝固的混合轻量土顶面敞开置于海水中,但是针对这种养护条件只测试分析了轻量土的重度随海水压力及时间的变化。Terashi等<sup>[37]</sup>将试样在试样筒内最短养护(室内温度 25℃,湿度 85%) 2 h(无侧限抗压强度 60 kPa),脱模后在黏土、海水等环境下养护,最后通过无侧限抗压强度试验对比水泥土的强度降低幅度。而真正意义上属于腐蚀性场地形成的水泥土的劣化研究尚未见报告。

笔者开发了一种能够近似模拟加固体形成环境的养护装置,利用这种养护装置并结合微型贯入试验可研究在腐蚀性场地形成的加固体的劣化问题。采用的研究方法及技术路线是,制备加固体→(不脱模)加固体顶面暴露于腐蚀性环境→微型贯入试验及物理化学试验。将原土与固化剂混合并装入顶面敞开的圆柱形容器后不脱模立即置于腐蚀性环境(溶液或土体)中养护,可模拟加固体的形成环境;养护后不脱模从与外界环境接触面开始实施加固体的微型贯入试验,可得到加固体强度(劣化)的时空分布规律;沿探头贯入方向以一定间隔取样实施物理化学试验,有助于阐明加固体劣化过程。

以下依次介绍可模拟加固体形成环境的养护装置、微型贯入仪及试验概况与初步试验结果。

## 2 腐蚀性场地形成的加固体的劣化试验

### 2.1 养护装置、微型贯入仪

养护装置如图 1 所示。装置由耐腐蚀的有机玻璃试样筒、养护筒及加长筒组成,壁厚均为 10 mm。试样筒内部直径 120 mm,高度 150 mm,侧面及底部不透水,顶面敞开,纵向一分为二,以便贯入试验结束后取出试样。养护筒内部直径 230 mm,高度为 200

mm,在底部设置的排水口供换水使用,侧面的排水孔连接透明的细塑料软管用于确认孔隙水压力或水压力。加长筒每个高度为 1000 mm,可根据需要利用法兰盘接高养护筒。

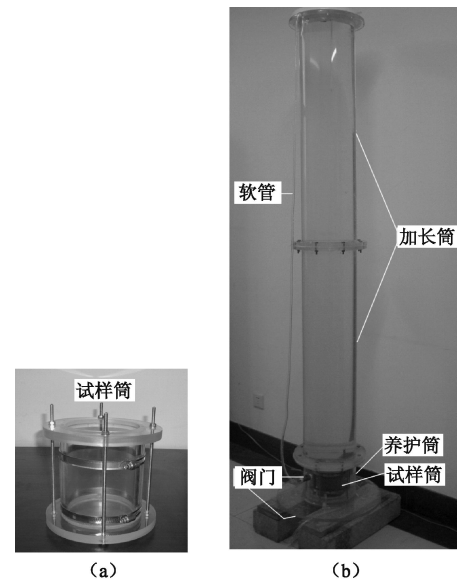


图 1 养护装置

Fig. 1 Curing apparatus for specimens

微型贯入仪(MCPT-1)委托南京土壤仪器厂有限公司制作,原理与文献[13]中的微型贯入仪相同,外观如图 2 所示。微型贯入仪为应变控制式,由马达、底座、反力装置、探头、探杆、荷载传感器、位移计及数字自动显示器组成。贯入速度为 0.1~4 mm/min。位移计测量长度为 150 mm,分辨率为 0.1 mm。贯入阻力与贯入深度利用数字自动显示器读取,峰值可自动保存。反力装置最大承受荷载为 10 kN,可以实施水泥土的无侧限抗压强度试验;探头及探杆为不锈钢材料制作,探头直径为 7 mm,锥角为 60°,探杆直径为 6 mm,可贯入长度为 130 mm。

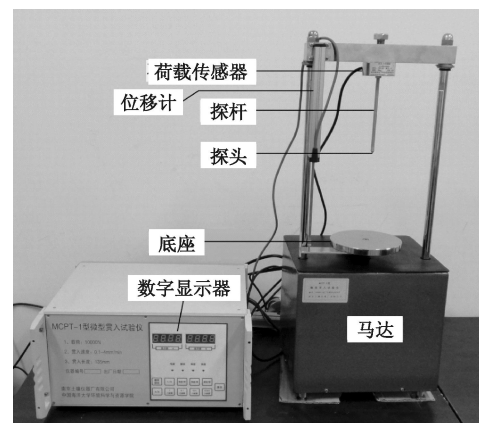


图 2 微型贯入仪

Fig. 2 Micro cone penetrometer

## 2.2 试验概况

原土为青岛胶州湾海相吹填软土, pH 值为 8.20, 基本物理性质: 密度=2.66 g/cm<sup>3</sup>, 天然含水率=73.6%, 塑限=28.7%, 液限=50.3%; 离子成分: Mg<sup>2+</sup>=303.9, Ca<sup>2+</sup>=714.0, Cl<sup>-</sup>=12407.5。

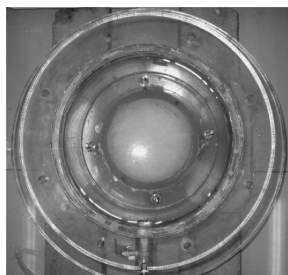
固化剂采用青岛鲁碧水泥制造有限公司生产的 P.O 42.5 水泥。

因为原土的天然含水率接近液限的 1.5 倍, 所以, 不需加水而将水泥直接掺入原土亦可搅拌均匀。以 16% 的掺入比 (水泥与原土的重量之比) 混合水泥和原土并搅拌均匀, 然后将水泥土装入试样筒, 刮平表面。在装入水泥土的过程中尽可能避免混入空气。整个过程在 8 min 内完成。

原土处于海水饱和软土地带, 本次试验只考虑孔隙水对水泥土劣化的影响, 不考虑水泥土周围软土的影响, 设计孔隙水压力为接近零和 2 m 水压力两种。将装有水泥土的试样筒立即放入养护筒, 在养护筒中注入海水至设定高度, 只允许试样筒敞开的部分 (顶面) 的水泥土与海水接触。图 3 (a) 为水压力接近零 (海水高出水泥土表面 10 mm, 水压力约为 0.1 kPa) 的水泥土 (记为试样 1) 养护浸泡情况, 水泥土与海水接触的表面没有发生离析等现象。经海水养护浸泡 24 h 后水泥土的表面变白, 可能是海水中的盐分聚集所致 (图 3 (b))。图 1 (b) 为 2 m 水压力的水泥土 (记为试样 2) 养护浸泡情况。海水温度保持在 20℃±2℃。本次试验设定的养护浸泡时间为 120 d。前 28 d 每 7 d 换一次水, 28 d 以后每 30 d 换一次水。水压力



(a) 放入时的水泥土表面情况



(b) 24 h 后水泥土的表面情况

图 3 海水中水泥土的表面情况 (水压力接近零的情况)

Fig. 3 Observation of cement-soil surface immersing in seawater (no pressure)

接近零的全部换掉, 2 m 水压力的试验, 从养护筒底部放水 7 L, 从上部倒入等量的新海水。

养护浸泡 120 d 后不脱模实施微型贯入试验 (图 4)。试样筒内径是 120 mm, 约为微型贯入试验探头直径 (7 mm) 的 17 倍, 而且圆形基础的破坏范围小于条形基础, 可以认为本试验条件下可忽略试样筒的边界效应<sup>[59-60]</sup>。

微型贯入试验使用的荷载传感器量程为 500 N, 分辨率为 0.1 N; 贯入速度设定为 1 mm/min。作为对比, 针对每一个试样 (试样 1 和试样 2) 分别从与海水有接触的顶面和与海水没有接触的底面开始实施贯入试验, 与海水没有接触可视为没有发生劣化。贯入阻力接近荷载传感器量程之前结束试验。本次试验使用的传感器量程偏小, 没有量测到最大贯入阻力。

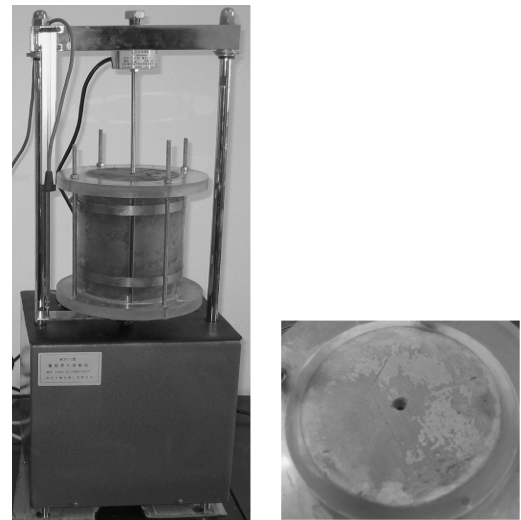


图 4 贯入试验过程及贯入后试样表面情况

Fig. 4 Penetration tests and following condition of a specimen

根据前述的场地环境变化引起的加固体劣化研究结果, Ca<sup>2+</sup>溶出与水泥土劣化有关。因此, 在贯入试验结束后, 测试了水泥土沿深度方向的 Ca<sup>2+</sup>浓度分布并利用扫描电子显微镜观察了水泥土结构。自表面分别切取 0~2 mm、2~4 mm、4~6 mm、6~10 mm、10~15 mm 各深度样品进行风干。选择 1 mm 孔径的筛, 将土样放入筛盘中过筛。称取过筛后的样品 10 g, 放入锥形瓶中, 加入 50 ml 蒸馏水, 在振荡器上振荡 12 h。然后将混合物过滤, 滤膜孔径选择 0.22 μm, 将所得滤液利用离子色谱仪 (ICS-3000) 进行化学成分分析, 测试试样的 Ca<sup>2+</sup>浓度分布。

## 3 试验结果与分析

微型贯入试验得到的贯入阻力 (N) 与贯入深度 (mm) 的关系曲线如图 5 所示。图中表示了从试样 1

(水压力接近零的试样)及试样 2 (2 m 水压力的试样)的劣化面和未劣化面贯入的试验结果。与从未劣化面贯入相比,从劣化面贯入同一深度时的阻力大幅下降。如果采用 Hara 等的劣化深度定义<sup>[13]</sup>,或将从未劣化面贯入时得到的曲线垂直下移与从劣化面贯入时的曲线重合得到劣化深度,或直线近似从劣化面贯入时的曲线的后半部分,取直线与纵轴的交点为劣化深度,则劣化深度大约为 6~7 mm。对于养护浸泡 120 d,掺入比为 16% 的水泥土而言,6~7 mm 的劣化深度是比较显著的。

另一方面,如图 5 所示,试样 2 (2 m 水压力的试样)的劣化深度略大于试样 1 (水压力接近零的试样)的劣化深度。考虑到从试样 2 的未劣化面的贯入阻力略大于试样 1 的贯入阻力,因此,可以认为水压力的作用使得劣化深度呈增加的趋势。

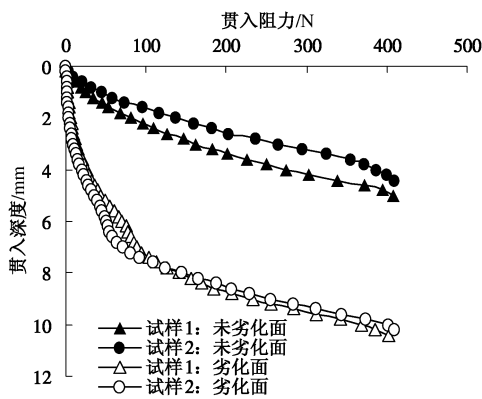


图 5 贯入试验结果

Fig. 5 Results of micro cone penetration resistance

图 6 为化学成分分析得到的与海水接触面起算的水泥土试样深度方向的  $Ca^{2+}$  浓度分布情况。水泥土试样中的  $Ca^{2+}$  浓度由深层的未劣化区逐渐向上运移,在劣化与未劣化混合区 (7 mm 左右) 聚集而达到最大。在劣化区,由深到浅  $Ca^{2+}$  浓度因溶出而依次减小,可

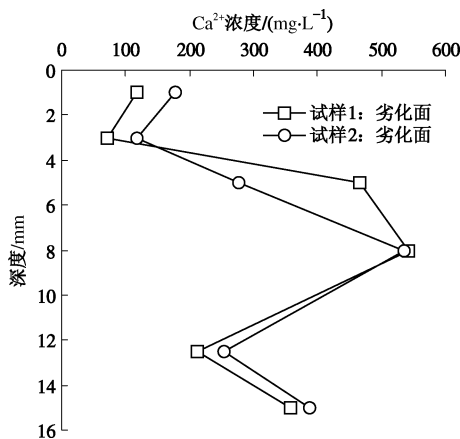
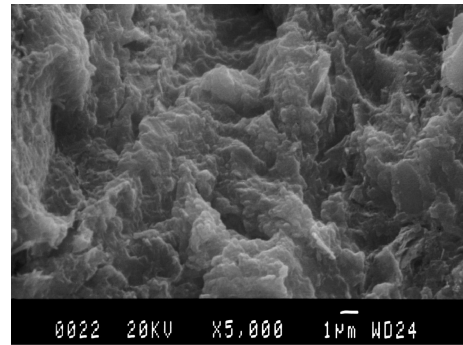


图 6  $Ca^{2+}$  浓度沿深度的分布

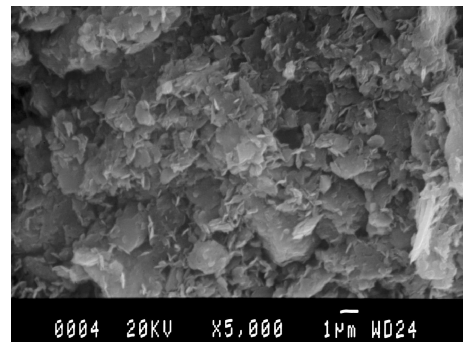
Fig. 6 Distribution of calcium ions over depth

能是被海水带走的缘故。有关  $Ca^{2+}$  溶出机理及与劣化的对应关系有待深入细致地研究。

图 7 为试样 1 (水压力接近零的试样)的未劣化与劣化部分的扫描电子显微镜图,二者的结构明显不同,未劣化部分的整体性良好,而劣化部分分布有较多的  $1\mu m$  左右颗粒。



(a) 未劣化部分(距劣化面深度10~15 mm)



(b) 劣化部分(距劣化面深度2~4 mm)

图 7 扫描电子显微镜图 (水压力接近零的情况)

Fig. 7 Images of SEM (no pressure)

## 4 结 论

本文在分析整理水泥土等加固体劣化研究的思路和方法的基础上,依次介绍了在腐蚀性场地形成的加固体的劣化研究方法、养护装置与微型贯入仪及初步的试验结果。

(1)开发了一种能够近似模拟加固体形成环境的养护装置。利用这种养护装置并结合微型贯入试验,采用制备加固体→(不脱模)加固体顶面暴露于腐蚀性环境→微型贯入试验及物理化学试验的研究方法及技术路线,可研究在各类腐蚀性场地形成的加固体的劣化问题。

(2)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;劣化的发生与  $Ca^{2+}$  的溶出有关,  $Ca^{2+}$  浓度随水泥土深度的变化趋势呈现一定的规律性。

腐蚀性场地形成的加固体的劣化问题复杂, 有必要利用微型贯入试验并结合渗透试验、扫描电镜、显微镜、酸碱度、化学成分分析、X 射线衍射等试验手段综合分析研究水泥土的强度(劣化)时空分布规律及不同时间的劣化机理(劣化过程)。

#### 参考文献:

- [1] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (GONG Xiao-nan. Ground improvement handbook[M]. 3rd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 林宗元. 岩土工程治理手册[M]. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. (LING Zong-yuan. Geotechnical engineering management handbook[M]. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [3] 周国钧. 岩土工程治理新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (ZHOU Guo-jun. New technology for geotechnical engineering management[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009. (in Chinese))
- [4] 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. (LIU Song-yu, QIAN Guo-chao, ZHANG Ding-wen. The principle and application of dry jet mixing composite foundation[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [5] 叶书麟, 叶观宝. 地基处理[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (YE Shu-lin, YE Guan-bao. Foundation treatment[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2004. (in Chinese))
- [6] 叶观宝. 地基加固新技术[M]. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 2002. (YE Guan-bao. New technology foundation reinforcement[M]. 2nd ed. Beijing: Mechanic Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [7] 郑俊杰. 地基处理技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004. (ZHENG Jun-jie. Ground treatment technology[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2004. (in Chinese))
- [8] 李彰明. 软土地基加固的理论、设计与施工[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006. (LI Zhang-ming. The theory of soft soil foundation reinforcement design and construction[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006. (in Chinese))
- [9] JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 2002. (JGJ79—2002 Technical code for ground treatment of buildings[S]. 2002. (in Chinese))
- [10] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (Foundation Treatment Manuals Committee. Foundation treatment manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2000. (in Chinese))
- [11] 郑刚, 顾晓鲁, 姜忻良. 水泥搅拌桩复合地基承载力辨析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 487 - 489. (ZHENG Gang, GU Xiao-lu, JIANG Xin-liang. Discussion on the bearing capacity of cement treated composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 487 - 489. (in Chinese))
- [12] 赵维炳, 施建勇. 地基处理与基础工程[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2000. (ZHAO Wei-bing, SHI Jian-yong. Ground improvement and foundation engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2000. (in Chinese))
- [13] HARA H, SUETSUGU D, HAYASHI S, et al. Calcium leaching properties of Lime-treated soil by infiltration of tidal river water[C]// Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference, 2008: 810 - 813.
- [14] HARA H, HAYASHI S, SUETSUGU D, et al. Study on the property changes of Lime-treated soil under sea water[J]. Journal of Geotechnical Engineering C, JSCE, 2010, 66(1): 21 - 31.
- [15] IKEGAMI M, et al. Physical properties and strength of cement-treated marine caly after 20 years[C]// Proc of 57th Annual Meeting, JSCE, 2002.
- [16] 张土乔. 水泥土的应力应变关系及搅拌桩破坏特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1992. (ZHANG Tu-qiao. On the stress-strain relationship of cement-soil and the failure mechanism of cement-soil pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1992. (in Chinese))
- [17] 苏乔, 徐兴永, 于洪军, 等. 莱州湾南岸海水入侵现状评价[J]. 海岸工程, 2009, 28(1): 9 - 15. (SU Qiao, XU Xing-yong, YU Hong-jun, et al. Assessment for present status of seawater intrusion into the south coastal area of Laizhou Bay[J]. Coastal Engineering, 2009, 28(1): 9 - 15. (in Chinese))
- [18] 陈广泉. 基于 GIS 的莱州湾地区海水入侵灾害风险评价研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010. (CHEN Guang-quan. Assessment of seawater intrusion disaster risk in Laizhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese))
- [19] KAMON M, YING C, KATSUMI T. Effect of acid rain on Lime and cement stabilized soils[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(4): 91 - 99.
- [19] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 第四版. 北京:

- 中国建筑工业出版社, 2007. (Editorial Committee of Engineering Geological Handbook. Engineering geological handbook[M]. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2007. (in Chinese))
- [21] 张 昆, 杨俊杰, 孙 涛, 等. 水泥固化海水湿排粉煤灰的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, **25**(11): 63 - 69. (ZHANG Kun, YANG Jun-jie, SUN Tao, et al. Test study on the wet fly ash from sea stabilized by cement[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, **25**(11): 63 - 69. (in Chinese))
- [22] 张 昆. 水泥固化粉煤灰的强度特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. (ZHANG Kun. Study on strength characteristics of the fly ash stabilized by cement[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. (in Chinese))
- [23] 林宏親, 西本聡, 大石幹太, 寺師昌明. セメント安定処理土の長期強度特性 その1—DJM改良柱体の現場調査—[J]. 北海道開発土木研究所月報, 2004, **611**: 11 - 19. (HAYASHI H, NISHIMOTO S, OHISHI K, et al. Long-term characteristics on strength of cement treated soil (part 1)[J]. Report of The Civil Engineering Research Institute for Cold Region, 2004, **611**: 11 - 19. (in Japanese))
- [24] 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))
- [25] 宁宝宽, 陈四利, 刘 斌, 等. 环境侵蚀下水泥土的力学效应试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 600 - 603. (NING Bao-kuan, CHEN Si-li, LIU Bin, et al. Experimental study of cemented soil under environmental erosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 600 - 603. (in Chinese))
- [26] 宁宝宽, 陈四利, 刘 斌. 环境侵蚀下水泥土力学特性的时间效应分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, **2**: 82 - 86. (NING Bao-kuan, CHEN Si-li, LIU Bin. The timing effects of mechanical properties of cemented soil under environmental erosion[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, **2**: 82 - 86. (in Chinese))
- [27] 宁宝宽, 刘 斌, 陈四利. 环境侵蚀对水泥土桩承载力影响的试验及分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, **26**(1): 299 - 302. (NING Bao-kuan, LIU Bin, CHEN Si-li. Bearing capacity study of cement-mixed soil pile under environmental erosion[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, **26**(1): 299 - 302. (in Chinese))
- [28] 韩鹏举, 白晓红, 赵永强, 等.  $Mg^{2+}$ 和  $SO_4^{2-}$ 相互影响对水泥土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(1): 72 - 76. (HAN Peng-ju, BAI Xiao-hong, ZHAO Yong-qiang, et al. Experimental study on strength of cement soil under  $Mg^{2+}$  and  $SO_4^{2-}$  interaction influence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(1): 72 - 76. (in Chinese))
- [29] 白晓红, 赵永强, 韩鹏举, 等. 污染环境对水泥土力学特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(8): 1260 - 1263. (BAI Xiao-hong, ZHAO Yong-qiang, HAN Peng-ju, et al. Experimental study on mechanical property of cemented soil under environmental contaminations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(8): 1260 - 1263. (in Chinese))
- [30] 韩鹏举, 白晓红, 赵永强, 等. 硫酸环境对水泥土强度影响的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2008, **39**(4): 404 - 407. (HAN Peng-ju, BAI Xiao-hong, ZHAO Yong-qiang, et al. The experimental study of cemented soil strength under  $H_2SO_4$  corrosive environment[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2008, **39**(4): 404 - 407. (in Chinese))
- [31] 傅小茜, 冯俊德, 谢友均. 硫酸盐侵蚀环境下水泥土的力学行为研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(增刊): 659 - 662. (FU Xiao-qian, FENG Jun-de, XIE You-jun. Mechanical behavior of soil cement under ambient with sulfate conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(S0): 659 - 662. (in Chinese))
- [32] 苗佳丽, 杨俊杰, 孙 涛, 等. 水泥加固海水湿排粉煤灰力学特性研究[C]// 第11届全国地基处理学术讨论会论文集. 海口, 2010. (MIAO Jia-li, YANG Jun-jie, SUN Tao, et al. Study on mechanical behavior of cement treated wet fly ash[C]// Proceedings of the 11th China National Conference of Ground Improvement. Haikou, 2010. (in Chinese))
- [33] 黄汉盛, 鄢泰宁, 兰 凯. 软土深层搅拌桩的水泥土抗腐蚀性室内试验[J]. 地质科技情报, 2005, **24**(增刊): 85 - 88. (HUANG Han-sheng, YAN Tai-ning, LAN Kai. Laboratory experiment of the anticorrosion of cement stabilized soft soil in deep mixing pile[J]. Geological Science and Technology Information, 2005, **24**(S0): 85 - 88. (in Chinese))
- [34] 谷秋芳, 潘盛山. 地下水影响粉喷桩强度的试验研究[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2001, **2**(4): 361 - 363. (GU Qiu-fang, PAN Sheng-shan. Influence of groundwater on compressive strength of powder jetted pile[J]. Journal of Beihua University (Natural Sciences), 2001, **2**(4): 361 - 363. (in Chinese))

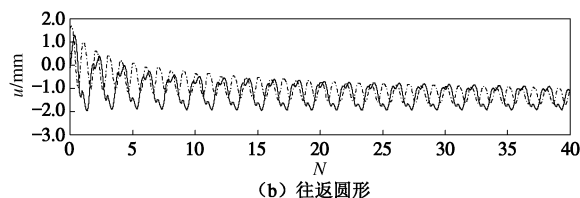
- [35] KITAZUME M, NAKAMURA T, TERASHI M, et al. Laboratory tests on long-term strength of cement treated soil[J]. *Grouting and Ground Treatment*, ASCE, 2003: 586 - 597.
- [36] ROLLING R S. Sulfate attack on cement stabilized sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, **121**(5): 364 - 372.
- [37] TERASHI M, TANAKA H, MITSUMOTO T, et al. 石灰・セメント系安定処理土の基本的特性に関する研究 (第3報) [J]. 港湾技術研究所報告, 1983, **22**(1): 69 - 96. (TERASHI M, TANAKA H, MITSUMOTO T, et al. Fundamental properties of lime and cement treated soils (3rd report)[J]. Report of The Port and Harbour Research Institute, 1983, **22**(1): 69 - 96. (in Japanese))
- [38] 土田孝, 笠井寿太郎, 水上純一, 等. 軽量混合処理土に及ぼす養生条件の影響[J]. 港湾技術研究所報告, 1996, **834**: 1 - 24. (TSUCHIDA T, KASAI J, MIZUKAMI J, et al. Effect of curing condition on mechanical properties of light-weight soils[J]. Report of The Port and Harbour Research Institute, 1996, **834**: 1 - 24. (in Japanese))
- [39] 土田孝. 港湾空港事業における軽量混合処理土工法の開発と適用事例[J]. 港湾技術研究所報告, 1999, **38**(2): 143 - 147. (TSUCHIDA T. Development and use of foamed treated soil in port and airport project[J]. Report of The Port and Harbour Research Institute, 1999, **38**(2): 143 - 167. (in Japanese))
- [40] 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 Xiao-ming. Microstructure and mechanism research on cement stabilized salt-rich clay[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))
- [41] 裴向军, 杨国春. 防治海水对水泥土侵蚀的试验研究[J]. 长春工程学院学报, 2000, **1**(1): 12 - 14. (PEI Xiang-jun, YANG Guo-chun. Research on preventing cement erosion in marine soil[J]. *Journal of Changchun Institute of Technology*, 2000, **1**(1): 12 - 14. (in Chinese))
- [42] 乔宏霞, 何忠茂, 朱彦鹏, 等.  $SO_4^{2-}$ 存在下水泥基复合材料力学性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, **14**(1): 69 - 76. (QIAO Hong-xia, HE Zhong-mao, ZHU Yan-peng, et al. Study on the mechanics of cement-based material in sulfate environment[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2006, **14**(1): 69 - 76. (in Chinese))
- [43] 王 军, 李 悦. 矿渣水泥混凝土抗海水侵蚀性能试验研究. 腐蚀与防护, 2006, **27**(8): 397 - 399. (WANG Jun, LI Yue. Corrosion resistance of slag concrete in sea water[J]. *Corrosion and Protection*, 2006, **27**(8): 397 - 399. (in Chinese))
- [44] 徐 超, 郭宏峰, 杨晓明, 等. 普硅水泥和矿渣水泥加固滨海软土效果对比分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(9): 2737 - 2740. (XU Chao, GUO Hong-feng, YANG Xiao-ming, et al. Comparison analyses of the effects of marine soft soil improved by portland cement and slag cement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(9): 2737 - 2740. (in Chinese))
- [45] 赵永强, 白晓红, 韩鹏举, 等. 土体污染对水泥土力学性质的影响[J]. 天津大学学报, 2008, **41**(1): 72 - 77. (ZHAO Yong-qiang, BAI Xiao-hong, HAN Peng-ju, et al. Effect of polluted soil on mechanical property of cemented soil[J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, **41**(1): 72 - 77. (in Chinese))
- [46] 储诚富, 刘松玉, 邓永峰, 等. 含盐量对水泥土强度影响的室内试验研究[J]. 工程地质学报, 2007, **15**(1): 139 - 143. (CHU Cheng-fu, LIU Song-yu, DENG Yong-feng, et al. The threshold of salt contents on strength of cement-mixed clays: a finding of laboratory tests[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, **15**(1): 139 - 143. (in Chinese))
- [47] 焦志斌, 刘汉龙, 蔡正银. 淤泥质酸性土水泥土强度试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(增刊): 57 - 60. (JIAO Zhi-bin, LIU Han-long, CAI Zheng-yin. Experimental study on cement-soil strength in mucky-acid soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(S0): 57 - 60. (in Chinese))
- [48] 储诚富, 洪振舜, 刘松玉, 等. 用以水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 645 - 649. (CHU Cheng-fu, HONG Zhen-shun, LIU Song-yu, et al. Prediction of unconfined compressive strength of cemented soils with quasi-water-cement ratio[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(4): 645 - 649. (in Chinese))
- [49] 朱 伟, 张春雷, 高玉峰, 等. 海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, **39**(10): 1561 - 1565. (ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, GAO Yu-feng, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, **39**(10): 1561 - 1565. (in Chinese))
- [50] 易小兵, 李英才. 含硫酸盐土壤的水泥土试验研究[J]. 广东水利水电, 2005(4): 1 - 2. (YI Xiao-bing, LI Ying-cai. Cement soil test study on soil with sulfate[J]. *Guangdong water resources and hydropower*, 2005(4): 1 - 2. (in Chinese))



- [51] 裴向军, 吴景华. 搅拌法加固海相软土水泥外掺剂的选择[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(3): 319 - 322. (PEI Xiang-jun, WU Jing-hua. Selection of cement additive in treating marine soft soil with DCM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(3): 319 - 322. (in Chinese))
- [52] 宁建国, 黄新, 许晟. 土样 pH 值对固化土抗压强度增长的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(1): 98 - 102. (NING Jian-guo, HUANG Xin, XU Sheng. Effect of pH value of soil on strength increasing of the stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 98 - 102. (in Chinese))
- [53] DU Yan-jun, LIU Song-yu, LIU Zhi-bin, et al. An overview of stabilization/solidification technique for heavy metals contaminated soils. Advances in environmental Geotechnics[C]// Proceedings of the international symposium on geoenvironmental engineering in Hangzhou. Hangzhou, 2009: 760 - 766.
- [54] CHEN Ping, QIN Bang-min. Experimental study on engineering properties of a dredged sediment solidified by common cementitious materials. Advances in environmental geotechnics[C]// Proceedings of the International Symposium on Geoenvironmental Engineering in Hangzhou, Hangzhou, 2009: 687 - 689.
- [55] 张小平, 俞仲泉. 粉煤灰掺石灰混合料的工程性质试验研究[J]. 河海大学学报, 1999, **27**(3): 57 - 62. (ZHANG Xiao-ping, YU Zhong-quan. Experimental study on engineering properties of flyash-lime mixture[J]. Journal of Hohai university, 1999, **27**(3): 57 - 62. (in Chinese))
- [56] 苗佳丽. 海水环境对水泥加固粉煤灰强度的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010. (MIAO Jia-li. Impact of seawater environment on cement treated fly ash[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese))
- [57] 东南大学岩土工程研究所. 淮盐高速公路泻湖相软土粉煤灰水泥搅拌法加固技术研究[R]. 南京: 东南大学, 2006. (Institute of Geotechnical Engineering of SEU. Study on technology of lagoonal soft soil in Huaiyan highway stirred with fly ash cement[R]. Nanjing: Southeastern University, 2006. (in Chinese))
- [58] CHEW S H, KAMRUZZAMAN A H M, LEE F H. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2004, **130**(7): 696 - 706.
- [59] 岡村未对, 竹村次朗, 木村孟. 砂地盤における円形及び帯基礎の支持力に関する研究[J]. 日本土木学会論文集, 1993, **463**/III-22: 85 - 94. (OKAMURA M, TAKEMURA J, KIMURA T. A study on bearing capacity of shallow footing on sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, 1993, **463**/III-66: 85 - 94. (in Japanese))
- [60] 豊澤康男, 杨俊杰, 三浦清一, 等. 遠心力載荷装置を用いた補強基礎地盤の支持力実験[J]. 日本土木学会論文集, 2004, **757**/III-66: 247-257. (TOYOSAWA Y, YANG Jun-jie, MIURA S, et al. Bearing capacity of reinforced ground using centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, 2004, **757**/III-66: 247 - 257. (in Japanese))

## 勘 误

2011年第7期1067页图2(b)有误, 应为



(b) 往返圆形

特此勘误。

(本刊编辑部)