

文章编号:1672-3031(2017)04-0297-06

现场条件下水泥土劣化试验及劣化深度预测

杨俊杰^{1,2}, 董猛荣^{1,2}, 孙涛³, 闫楠^{1,2}, 尚金瑞⁴

(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. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 4. 日照港集团, 山东 日照 276808)

摘要: 加固体的劣化可分为加固体在非腐蚀场地形成后由于场地受到污染而发生的劣化问题和在腐蚀场地形成的加固体的劣化问题。针对后者, 采用现场取土、室内制备加固体试样、现场埋设的方法, 模拟在腐蚀场地形成加固体的过程, 埋设在现场的加固体在腐蚀介质及水动力、温度和潮汐等外界因素共同作用下将发生劣化。将水泥土试样埋设在滨海场地长达3.5年, 并实施微型贯入试验和化学试验。试验结果表明, 劣化引起的强度降低滞后于其化学反应; 水泥掺入比越小、埋设时间越长, 水泥土劣化越严重; 本试验条件下, 水泥掺入比15%的水泥土1年、2.5年和3.5年的劣化深度分别达到了3.5、5.8和7.6 mm。基于试验结果提出了水泥土劣化深度预测式。

关键词: 海相软土; 水泥土; 微型贯入试验; 劣化; 劣化深度预测

中图分类号: TV431

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.04.009

1 研究背景

长期处于海水^[1-2]、盐渍土^[3]和污染环境^[4-6]等腐蚀地基中的水泥土等加固体, 会不可避免地发生强度降低、渗透性增大的劣化现象。笔者根据工程背景, 将加固体的劣化问题分成两类并提出了相应的室内模拟方法^[7]。

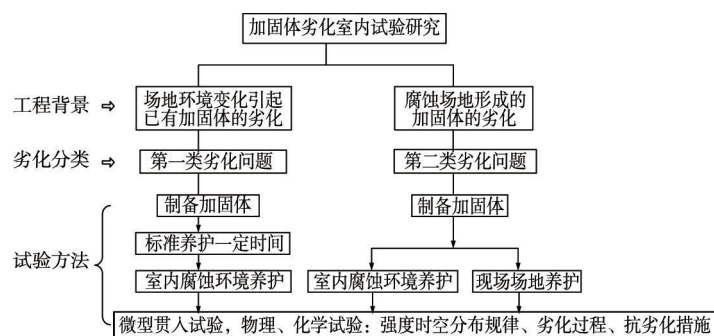


图1 劣化问题的分类及其研究思路^[7]

在非腐蚀场地形成一段时间的加固体, 因场地受到污染或海水入侵、盐渍化而发生的劣化问题属于第一类, 如图1左侧所示, 对于这类劣化问题, 可采用先标准养护一定时间再将加固体与腐蚀环境接触的方式进行模拟。目前的劣化研究基本上属于第一类。

在污染场地、滨海及盐渍化场地等腐蚀场地形成的加固体, 其形成强度的同时即受到腐蚀介质的侵蚀, 这类劣化问题属于第二类, 如图1右侧所示。室内模拟研究第二类劣化问题的关键, 是使加固体顶面在形成后立即与腐蚀环境接触。此时, 由于加固体不能自立, 而且养护(本文所提即置于腐蚀介质中劣化)后实施的是贯入试验, 所以在养护过程中和贯入试验时均不需脱模。室内制样后可埋设于原土进行室内养护, 或埋设于水动力、温度和潮汐等因素共同作用的现场场地进行养护^[8]。因此, 养护

收稿日期: 2017-06-15

作者简介: 杨俊杰(1962-), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程研究。E-mail: jjyang@ouc.edu.cn

通讯作者: 孙涛(1972-), 男, 山东高密人, 博士, 研究员, 主要从事生态边坡、桩基础研究。E-mail: sunystao@qq.com

时间即埋设时间或劣化时间。

本文采用现场取土、室内制备水泥土试样、现场埋设的方法,模拟在腐蚀场地形成水泥土的过程,研究水泥土试样在海相软土及水动力、温度和潮汐等外界因素共同作用下的劣化过程,并提出水泥土劣化深度预测计算公式。

2 试验概况

试验过程如图2所示。

(1)试验用土取自山东日照岚山港围海造陆形成的淤泥区,测得原土pH值为8.20。基本离子成分: $Mg^{2+}=303.9\text{ mg/L}$, $Ca^{2+}=714.0\text{ mg/L}$, $Cl^{-}=12407.5\text{ mg/L}$, $SO_4^{2-}=2401.5\text{ mg/L}$, $HCO_3^{-}=3051.0\text{ mg/L}$,总矿化度为26287.4 mg/L。原土密度 2.66 g/cm^3 ,天然含水量73.6%,塑限28.7%,液限50.3%。

(2)固化剂采用42.5普通硅酸盐水泥。分别以7%、10%、15%及20%的水泥掺入比(水泥与原土的重量之比)制作水泥土试样。试样筒为有效直径110 mm、高度145 mm的塑料烧杯。将水泥和原土混合并搅拌均匀后装入试样筒,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5 min内完成。

(3)水泥土试样制备完成后,立即将原土覆盖在水泥土试样敞露部位,然后运往现场进行埋设。

(4)现场掩埋区为潮汐作用区,高潮时水深0.8 m,落潮后地面则露出水面。水泥土试样顶面距离地表(埋设深度)约为0.4 m。

(5)现场场地养护时间(埋设时间)分别为28、60、90、180、360、900和1260 d。根据埋设坐标,取出达到龄期的试样。

(6)实施微型贯入试验。探头直径3.4 mm,每一个试样在等距离的三点进行贯入试验,贯入点与贯入点、贯入点与内壁的距离均为24.9 mm。

(7)化学成分分析。

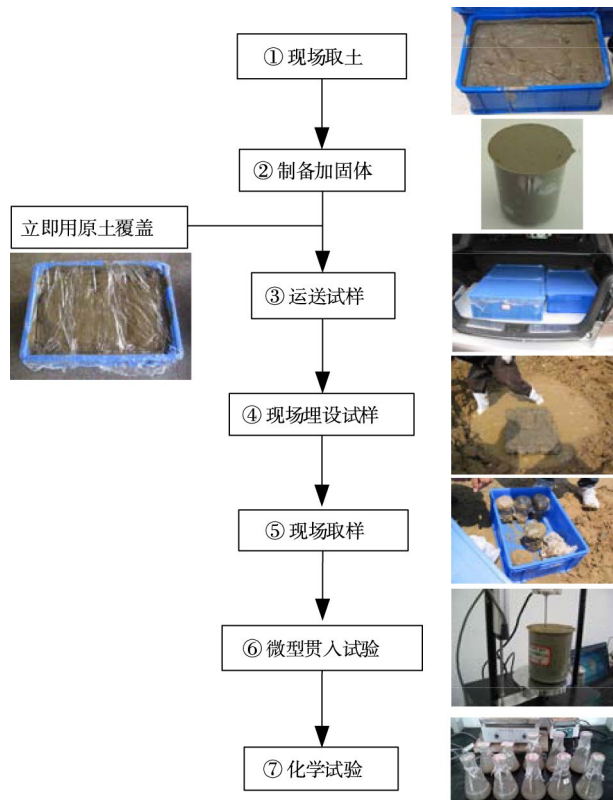


图2 试验过程

3 水泥土劣化特性

图3为不同水泥掺入比、不同养护时间的水泥土试样的贯入阻力与贯入深度的关系曲线,其中,部分试样因遗失没有试验数据。相同试验条件的试样各有3条贯入曲线。

由图3可见,开始时贯入阻力几乎为零且随着养护时间的增长这种趋势越明显,贯入阻力为零可认为水泥土发生了劣化。但是贯入到某一深度后,曲线开始出现拐点,贯入阻力随着贯入深度直线增加,之后再次出现拐点,贯入阻力随着贯入深度而缓慢增加,可认为此时强度为未劣化水泥土强度,视为水泥土的固化强度。同一养护时间的水泥土,其水泥掺入比越大,固化强度越高。

笔者根据劣化及未劣化试样贯入阻力曲线特征定义了劣化深度(如图4所示)^[7,9],劣化层包括贯入阻力为零的完全劣化层(深度为 D_1)和劣化过渡层(深度为 D_2),劣化层的深度 D 即为劣化深度。

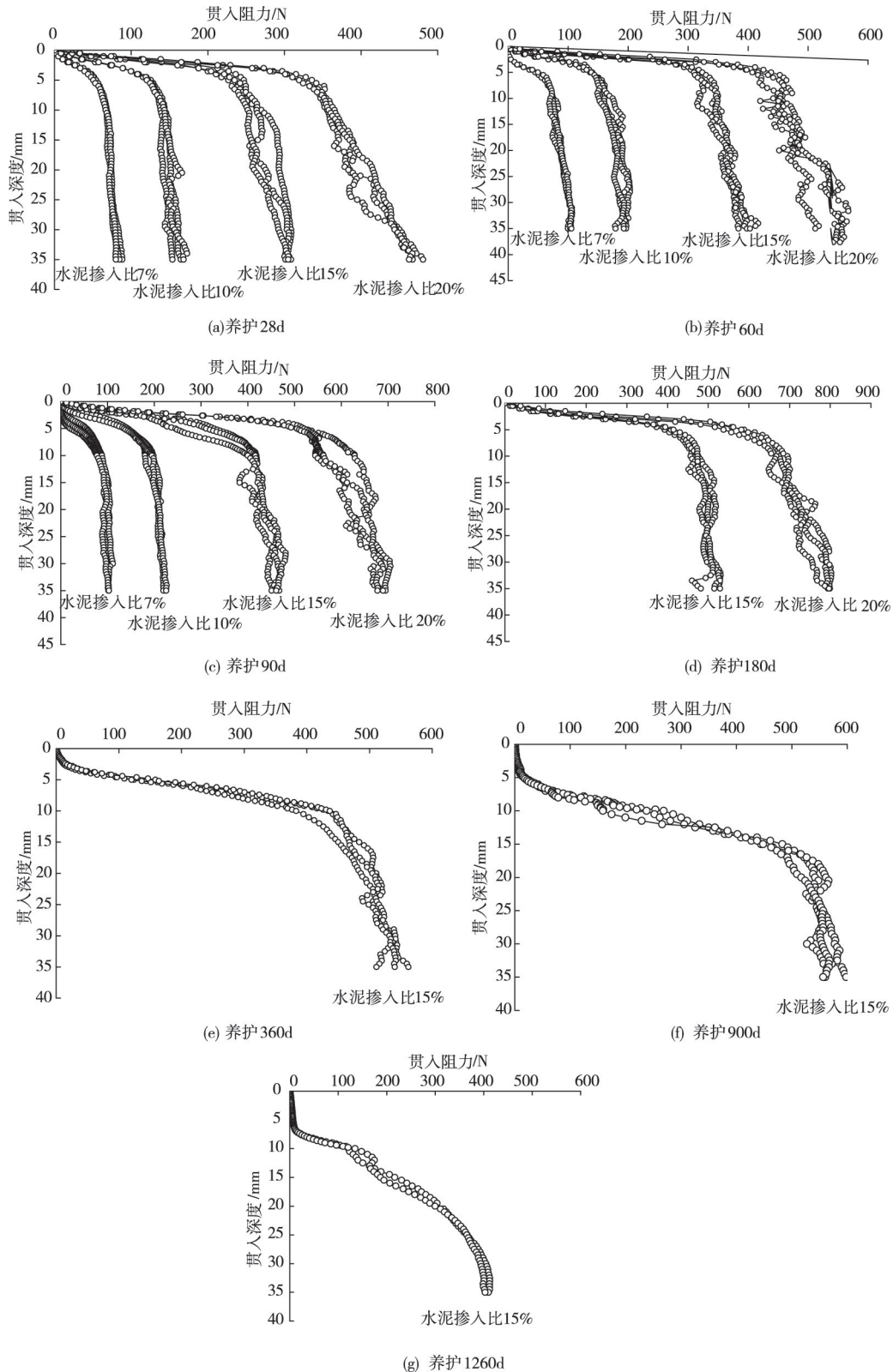


图3 贯入阻力与贯入深度关系曲线

图5为劣化深度与养护时间及水泥掺入比的关系。本试验条件下,水泥掺入比15%水泥土的劣化深度随现场养护时间而增大,360、900和1260 d的劣化深度分别达到了3.5、5.8和7.6 mm。相同养护时间水泥掺入比越小劣化深度越深,掺入比7%的水泥土由于强度低导致劣化较快。

针对养护1260 d的水泥土,在微型贯入试验结束后,从试样表面开始,分别切取0~5、5~10、

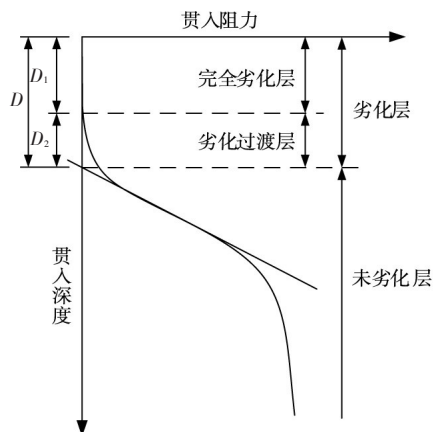
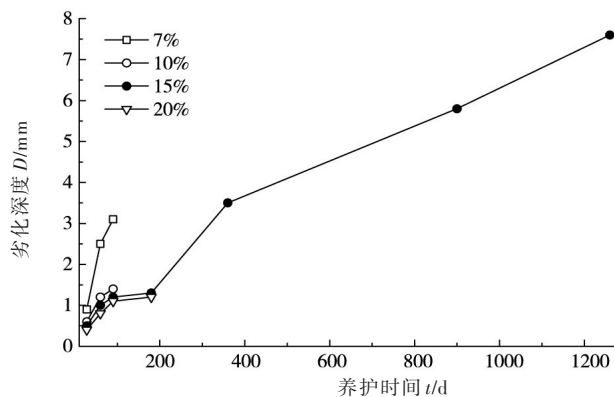

 图4 由贯入阻力曲线定义的劣化深度^[7, 9]


图5 不同水泥掺入比下劣化深度与养护时间关系曲线

10 ~ 15、15 ~ 20 和 20 ~ 25 mm 各深度处水泥土，根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)，分别测试 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量，其结果如图 6 所示，图中虚线表示劣化深度。由图 6 可见，随着深度的增加， Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量逐渐减少，而 Ca^{2+} 含量逐渐增加，说明劣化会导致 Ca^{2+} 溶出， Ca^{2+} 的溶出是水泥土劣化的标志。 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 浓度从 15~20 mm 处到 10~15 mm 处变化明显，说明在 10~15mm 处依然存在化学反应，而微型贯入试验得到的劣化深度仅为 7.6 mm，因此可认为劣化引起的强度降低滞后于其化学反应。

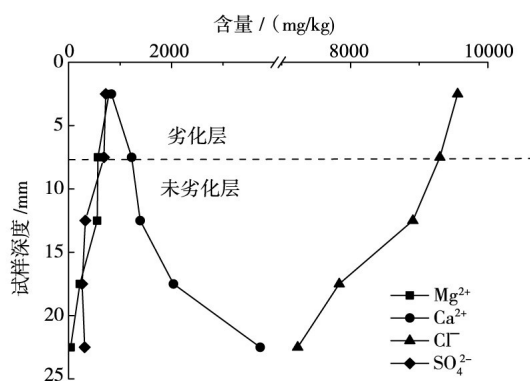


图6 离子含量随深度分布曲线

4 水泥土长期劣化深度预测

目前，很多学者基于室内试验或现场试验结果，提出了不同的水泥土劣化深度预测式。

有的学者采用指数函数预测式：

$$D = At^B \quad (1)$$

式中： D 为劣化深度，mm； t 为劣化时间，年； A 、 B 为常数。

Ikegami 等^[10]和 Hayashi 等^[11-12]取 A 为 1 年的劣化深度 (mm)，取 B 为 0.5。因此，只要给出 1 年的劣化深度，即可预测水泥土长期劣化深度。Hara 等^[13]同样取 B 为 0.5，但未给出 A 的物理意义，需通过试验数据拟合确定，因此，无法利用该式进行预测。

闫楠^[14]提出了原土养护条件下的指数函数预测式：

$$D = abt^c \quad (2)$$

式中： a 、 b 、 c 为常数。

还有学者采用对数函数预测水泥土长期强度。

Miao^[15]提出的对数函数式：

$$D = a \ln b - a \ln(t + b) \quad (3)$$

式中： a 为由水泥土初始条件决定的常数； b 为由海水浓度决定的变量。

闫楠^[14]针对海水养护条件下提出了对数函数预测式：

$$D = \ln(a + bt) \quad (4)$$

式中： a 、 b 为与水泥土掺入比相关的常数。

闫楠和 Miao 预测式中的参数确定方法针对性较强, 使用时存在一定的不确定性。

综上所述, Ikegami 等和 Hayashi 等提出的预测式具有预测功能, 但其需要已知待预测水泥土 1 年的劣化深度, 时间较长, 因此, 本文提出根据 90d 劣化深度推测长期劣化深度的预测式:

$$D = D_{90}(t/90)^A \quad (5)$$

式中: D 为水泥土劣化深度, mm; D_{90} 为 90d 劣化深度, mm; t 为劣化时间; A 为待定常数。

图 7 为 Ikegami 等^[10]、Hayashi 等^[11-12]和本文的预测结果及本文试验结果。其中式(5)中的待定常数 A 分别取 0.5 和 0.7。由图 7 可见, Ikegami 等和 Hayashi 等的预测结果($R^2 = 0.9697$)通过 360d(1 年)的数据点, 长期预测结果略微偏小。本文的预测结果通过 90d 的数据点, 当待定常数 A 取 0.7 时, 预测结果与试验结果基本吻合, R^2 为 0.9945; 当待定常数 A 取 0.5 时, 与 Ikegami 等和 Hayashi 等取相同值时, 预测结果与试验结果相差较大, R^2 仅为 0.8603, 说明 A 的取值对预测结果影响敏感。但是, 根据多数学者的试验结果, 取 A 为 0.5, 本文试验数据虽少, 但是劣化时间长, 达到 3.5 年(1260d)。因此, 建议 A 的取值范围为 0.5 ~ 0.7。

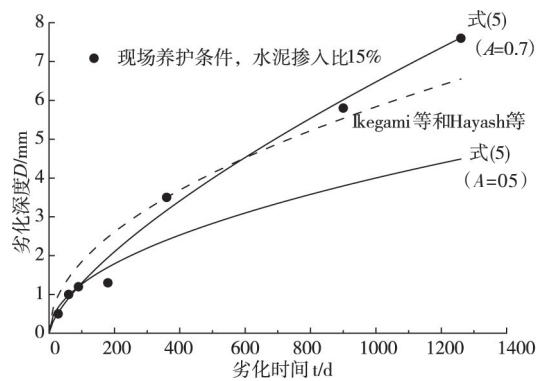


图 7 劣化深度预测结果与试验结果对比

5 结语

针对腐蚀场地形成的加固体的劣化问题, 提出现场取土、室内制备加固体试样、现场埋设的方法, 模拟在腐蚀场地形成加固体的过程, 研究了水泥土试样在海相软土及水动力、温度和潮汐等外界因素共同作用下的劣化过程, 并提出水泥土劣化深度预测式。本文得出如下结论: (1) 水泥掺入比越小、养护时间越长, 水泥土劣化越严重。水泥掺入比为 15 % 的水泥土试样, 养护 3.5 年时劣化深度达 7.6 mm。(2) 在水泥土试样中化学反应先于劣化。(3) 提出水泥土长期劣化深度预测式($D = D_{90}(t/90)^A$), 只需知道水泥土 90 d 劣化深度 D_{90} , 利用建议的常数 A 取值范围(0.5 ~ 0.7), 即可预测该种水泥土长期劣化深度。

参 考 文 献:

- [1] 杨俊杰, 闫楠, 刘强, 等. Laboratory Test on Long-Term Deterioration of Cement Soil in Seawater Environment [J]. Transactions of Tianjin University, 2016, 22(2): 132-138.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 韩鹏举, 王帅, 陈幼佳, 等. Mechanism of cement-stabilized soil polluted by magnesium sulfate[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(5): 1869-1877.
- [5] 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 .
- [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 .
- [7] 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 .
- [8] 杨俊杰, 尚金瑞, 闫楠, 等. 一种研究现场条件下加固体劣化问题的试验方法[J]. 地基处理, 2015, 26(4): 16-21 .
- [9] 杨俊杰, 张玥宸, 闫楠, 等. 场地形成的水泥土的劣化室内模拟试验[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(3): 1-5 .
- [10] IKEGAMI M, ICHIBA T, TERASHI M. The simple prediction method on the deterioration of cement treated soil [J]. Society of Civil Engineers Annual Conference, 2004, 29(1): 3-537 .
- [11] HAYASHI H, NISHIMOTO S, OHISHI K. Long-term characteristics on strength of cement treated soil (Part 1) [R]. Civil Engineering Research Institute of Hokkaido Development Monthly Report, 2004(611): 11-19 .
- [12] HAYASHI H, NISHIMOTO S, OHISHI K. Long-term characteristics on strength of cement treated soil (Part 2) [R]. Civil Engineering Research Institute of Hokkaido Development Monthly Report, 2004(612): 28-36 .
- [13] 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 .
- [14] 闫楠. 滨海相软土场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 .
- [15] MIAO Jiali. Evaluation on long term durability of cement stabilized soils under seawater environment[D]. Fukuoka: Kyushu University, 2013 .

Test of cement soil degradation under in-suit conditions and degradation depth prediction

YANG Junjie^{1, 2}, DONG Mengrong^{1, 2}, SUN Tao³, YAN Nan^{1, 2}, SHANG Jinrui⁴

- (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. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
4. Rizhao Port Group, Rizhao 276808, China)

Abstract: The deterioration of the reinforced structure can be classified into the deterioration problem due to site pollution after the reinforced structure is formed in the non-corrosive site and the deterioration problem that the reinforced structure is formed in the corrosive site. Aiming at the latter, the method of taking soil from site, preparing reinforced structure in door, and burying reinforced structure in site is implemented. Reinforced structure buried in site will be deteriorated under the influence of corrosive media and the external factors such as hydrodynamic force, temperature and tide. The micro-penetration test and chemical tests of the cement soil samples buried in the coastal site for 3.5 years are conducted. The results show that the decrease of strength caused by deterioration lags behind its chemical reaction and the deterioration of cement soil are more serious under the condition of less cement ratio and longer buried time. Under the experimental conditions, the degradation depth of cement sample whose cement ratio is 15% reached 3.5mm, 5.8mm and 7.6mm after 1 year, 2.5 years and 3.5 years respectively. Based on the experimental results, the prediction formula of degradation depth of cement soil is put forward.

Keywords: marine soft soil; cement soil; micro penetration test; degradation; degradation depth prediction

(责任编辑: 王冰伟)