

DOI: 10.11779/CJGE20230814

水泥固化海相软土劣化深度快速预测方法

王 曼^{1,2}, 杨俊杰^{1,2}, 武亚磊^{*1,2}, 王子谋^{1,2}

(1. 中国海洋大学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)

摘 要: 劣化深度是评价固化土劣化程度较为简明的指标。基于常规腐蚀试验结果的幂函数形式固化土劣化深度预测方法具有实用性, 腐蚀试验中腐蚀时间取值越长、劣化深度越深, 预测结果越准确。固化土劣化是漫长的过程, 利用高浓度腐蚀介质的加速腐蚀试验可缩短试验周期, 实现劣化深度的快速预测。水泥固化海相软土的腐蚀试验结果表明, 3倍浓度海水制备的腐蚀土腐蚀水泥土 28 d 的加速腐蚀试验与常规腐蚀试验腐蚀 360 d 的劣化深度存在线性关系, 基于两者的等效关系并结合幂函数形式劣化深度预测式, 提出水泥固化海相软土劣化深度快速预测方法, 预测的劣化深度发展趋势与实测结果较为吻合。基于加速腐蚀试验结果的幂函数形式固化土劣化深度快速预测方法可行且具有实用性, 研究思路对于类似劣化问题的研究具有一定的借鉴意义。

关键词: 水泥土; 海相软土; 加速腐蚀试验; 等效劣化深度; 快速预测

中图分类号: TU448

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)07-1549-07

作者简介: 王 曼(1994—), 女, 博士研究生, 主要从事软土地基加固等方面的研究工作。E-mail: 694501276@qq.com。

A rapid prediction method for deterioration depth of cement-solidified marine soft soils

WANG Man^{1,2}, YANG Junjie^{1,2}, WU Yalei^{*1,2}, WANG Zimou^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology of the Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The deterioration depth is a relatively simple index to evaluate the deterioration degree of solidified soils. The practical prediction method for the deterioration depth of solidified soils is in the form of power function based on the results of the conventional deterioration tests, while the longer the corrosion time and the deeper the deterioration depth, the more accurate the predicted results. The deterioration of solidified soils is a lengthy process, and the accelerated deterioration tests for high concentration corrosive media can shorten the test period and obtain rapid prediction of the deterioration depth. The deterioration test results of cement-solidified marine soft soils indicate that there is a linear relationship between the 28 d accelerated deterioration test of erosion soil prepared with 3 times seawater concentration and the 360 d deterioration depth of the conventional deterioration tests. Then based on the equivalent relationship between them and the power function formula for predicting the deterioration depth, a rapid prediction method for the deterioration depth of cement-stabilized marine soft soils is proposed, and the predicted development trend of the deterioration depth is consistent with the measured results. The rapid prediction method for the deterioration depth of solidified soils based on the accelerated deterioration test results in the power function form is feasible and practical. The research idea is of certain reference significance for the researches on the similar deterioration problems.

Key words: cement soil; marine soft soil; accelerated deterioration test; equivalent deterioration depth; rapid prediction

0 引 言

旋喷桩、搅拌桩等固化土结构是海相软土地基常用的地基处理技术^[1-2]。由于海水离子的长期腐蚀作用, 使得固化土材料性能发生劣化^[3-5], 导致固化土结构表层强度降低, 严重影响其耐久性^[6-10]。研究并预测劣化程度随腐蚀时间的演化规律, 可为工程全寿命设计和耐久性评价提供理论依据。

劣化程度可用固化土试样在劣化前后的强度^[10-16]、质量^[17]、体积^[12]等的变化率作为评价指标; 也可借助微型贯入试验仪, 通过沿劣化方向的贯入阻力变化趋势确定的劣化深度作为评价指标^[10-11, 13, 18], 试验结果不受固化土试样尺寸影响, 针对不同腐蚀时间的固化

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378380, 52078474, 51779235)

收稿日期: 2023-08-22

*通信作者(E-mail: wuyalei@ouc.edu.cn)

土试样,可以得到其强度在时间和空间上的分布特征;对于碳化导致的劣化常采用酚酞指示剂法得到的碳化深度作为评价指标^[19-20]。

为预测劣化深度随腐蚀时间的发展规律,通常根据腐蚀试验得到的劣化深度变化规律假定函数关系,如,指数函数^[21]、对数函数^[2, 22-25]、幂函数^[10-11, 13, 22, 26-28]等,利用试验数据拟合确定函数关系中的参数,从而得到劣化深度预测式。其中,幂函数形式预测式(式(1))只含一个拟合参数 A ,且大量试验结果表明 A 在较小的范围内波动^[11, 26],因此,可以认为 A 是一个不受固化土条件影响的常数。式(1)具有预测功能,且应用性较强,仅需利用测得的某一腐蚀时间的劣化深度,即可预测任意腐蚀时间的劣化深度^[27]。

$$D = D_{(c, t_0)} \left(\frac{t}{t_0} \right)^A \quad (1)$$

式中: D 为劣化深度(mm); t 为腐蚀时间(d); $D_{(c, t_0)}$ 为与固化土结构所处腐蚀环境腐蚀介质浓度(记为 c)一致的室内常规腐蚀试验在腐蚀时间 t_0 时测得的劣化深度(mm); A 为拟合参数,可取0.5~0.7。

式(1)预测结果的准确性取决于腐蚀时间 t_0 和劣化深度 $D_{(c, t_0)}$ 。一方面,由式(1)可知, t_0 越大越能反映腐蚀时间对固化土劣化的影响规律,即, t_0 取值越大,预测的劣化规律越符合实际情况;另一方面,劣化深度 $D_{(c, t_0)}$ 与腐蚀时间 t_0 有关, t_0 越大 $D_{(c, t_0)}$ 也越大,由贯入仪器测得的 $D_{(c, t_0)}$ 的误差相对较小。固化土的常规腐蚀试验结果表明,固化土劣化是一个较为漫长的过程,腐蚀时间较短时,劣化深度较小,如 t_0 取28, 90, 180 d^[29],贯入试验测得的劣化深度精度受到影响且对应的预测结果较为敏感^[30]。 t_0 取365 d或360 d能提高预测精确度^[26-28],但试验周期较长。因此如何快速、准确、简单获取 $D_{(c, t_0)}$ 是提高劣化深度预测式实用性的关键。研究结果表明,采用高浓度腐蚀介质腐蚀固化土的室内加速腐蚀试验,可快速获得与常规腐蚀试验等效的固化土劣化深度^[10, 31-36]。

本文利用水泥土加速腐蚀试验及常规腐蚀试验,得到3倍浓度海水制备的腐蚀土腐蚀水泥土28 d的劣化深度($D_{(3c, 28)}$)与常规腐蚀试验腐蚀360 d劣化深度($D_{(c, 360)}$)的相关关系,利用加速腐蚀试验得到的等效劣化深度 $D_{(3c, 28)}$ 并结合幂函数形式的劣化深度预测式(式(1)),构建劣化深度快速预测方法并利用常规腐蚀试验结果进行验证。基于加速腐蚀试验结果的幂函数形式固化土劣化深度快速预测方法,也可用于类似劣化问题的研究。

1 基于等效劣化深度的腐蚀试验设计

式(1)中 $D_{(c, t_0)}$ 与所处腐蚀环境腐蚀介质浓度 c 、

腐蚀时间 t_0 对应。基于此,高浓度的同一腐蚀介质(记为nc)加速腐蚀试验在腐蚀时间 t_a 得到的劣化深度设为 $D_{(nc, t_a)}$,即等效劣化深度。则, $D_{(nc, t_a)}$ 与 $D_{(c, t_0)}$ 存在如式(2)所示的关系。

$$D_{(c, t_0)} = \alpha D_{(nc, t_a)} \quad (2)$$

式中: α 为等效关系系数; $D_{(nc, t_a)}$ 为nc浓度的同一腐蚀介质、腐蚀时间 t_a ($t_a < t_0$)时测得的与 $D_{(c, t_0)}$ 等效的劣化深度。

将式(2)代入式(1)得

$$D = \alpha D_{(nc, t_a)} \left(\frac{t}{t_0} \right)^A \quad (3)$$

式中: D , t , t_0 , A 同式(1); α , $D_{(nc, t_a)}$ 同式(2)。

本文以海相软土场地中水泥土为研究对象,因此将海相软土作为腐蚀介质。前期研究结果表明^[37],水泥土的劣化深度随腐蚀介质浓度增加,但浓度过高时盐容易在腐蚀介质中和水泥土表面结晶,阻碍后期劣化的发展,所以选择3倍浓度海水制备的腐蚀土作为腐蚀介质实施加速腐蚀试验。水泥土劣化深度随腐蚀时间增加,考虑到预测式的实用性,本文选用28 d作为加速腐蚀试验腐蚀时间,并建立与常规腐蚀试验腐蚀360 d水泥土劣化深度的等效关系。

1.1 试验材料

试验用土取自山东省胶州湾和东营港,其粒径级配和基本物理性质分别如图1和表1所示。依据《土的工程分类标准》^[38]胶州湾软土属于低液限黏土,东营港软土属于低液限粉土。试验用水泥为潍坊鲁元建材有限公司生产的P.O 42.5。

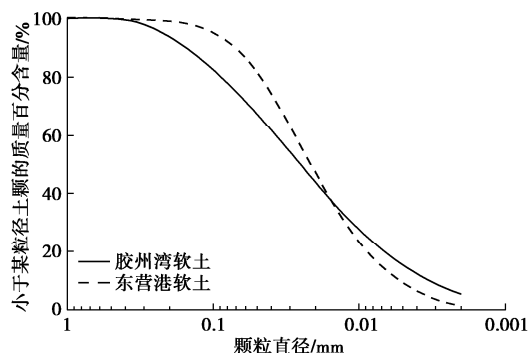


图1 试验用土的颗粒粒径级配累积曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of soils

表1 试验用土的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soils

试验用土	塑限 w _p /%	17 mm 液限 w _L /%	塑性指 数 I _p	相对质 量密度 G _s	分类
胶州湾软土	21.0	31.3	10.3	2.72	低液限黏土
东营港软土	26.5	29.7	3.2	2.70	低液限粉土

胶州湾、东营港海水及试验用配置海水主要离子浓度如表2所示。试验用海水参照胶州湾、东营港海水主要离子的浓度，并利用海水素进行配置。 c 表示为1倍浓度的人工海水， $3c$ 表示用于加速腐蚀试验的3倍浓度的人工海水。浓度为 c 的人工海水的盐度为33，pH为7.9，无色无泡沫无沉淀，离子强度渗透压和缓冲容量与天然海水基本一致。

表 2 胶州湾、东营港海水及人工海水主要离子质量浓度
Table 2 Concentrations of major ions in seawater

项目	Ca ²⁺ / (mg·kg ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg·kg ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg·kg ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg·kg ⁻¹)	pH
胶州湾海水	241.3	1149.3	13837.2	2198.3	8.3
东营港海水	296.2	1065.5	16821.3	2563.8	8.0
c	300	1200	14000	2400	7.9
$3c$	900	3600	42000	7200	7.9

1.2 水泥土试样制备方法

制备水泥土试样时，为确保试样均匀，依据前期试验结果，选择试验用土的 1.5 倍液限值的水量作为拌合用水量。将试验用土风干后与水泥混合，加入浓度为 c 的拌合用水搅拌均匀，再分层填入内径 85 mm、高 105 mm 的试样筒^[5,18]，振出气泡后刮平表面(图 2)。制样时保证每个水泥土试样重度相近。



图 2 制备好的水泥土试样（东营港软土， $a_w=14\%$ ）
Fig. 2 Prepared cement soil sample (soft soil of Dongying Port, $a_w=14\%$)

1.3 水泥土试样制备方案

水泥土试样制备方案如表 3 所示。其中，水泥掺入比 a_w 为水泥与干土的质量之比，灰水比 R 为水泥质量与土中水和水泥浆中水的质量之和的比值。

表 3 水泥土试样制备方案
Table 3 Preparation schemes of cement soil samples

试验用土	水泥掺入比 $a_w/\%$	灰水比 R
胶州湾软土	7, 10, 14	0.3129
		0.4694
		0.6259
东营港软土	7, 10, 14	0.3248
		0.4873
		0.6497

1.4 常规腐蚀与加速腐蚀试验

常规腐蚀试验的腐蚀介质是利用浓度为 c 的人工

海水与试验用土搅拌而成的腐蚀土，而加速腐蚀试验的腐蚀介质则是利用浓度为 $3c$ 的人工海水和试验用土搅拌制备成的腐蚀土。

将制备好的水泥土试样立即置于容积为 2.5 L 的腐蚀容器内，填入腐蚀土覆盖水泥土试样，覆盖厚度约为 20 mm。用保鲜膜密封腐蚀容器，在恒温（ $20\pm 2^\circ\text{C}$ ）条件下封存至设定的腐蚀时间。其中，常规腐蚀试验的腐蚀时间为 360 d，加速腐蚀试验的腐蚀时间为 28 d。

1.5 劣化深度测试方法

采用微型贯入试验测定劣化深度。试验仪为应变控制（图 3），加载速率为 2 mm/min，探头直径为 3.4 mm，每一个试样在等距离的 3 个点进行贯入试验，贯入点与贯入点、贯入点与内壁的距离均为 24.9 mm，约为探头直径的 7 倍^[18,39]，本试验条件下可忽略试样筒的边界效应。

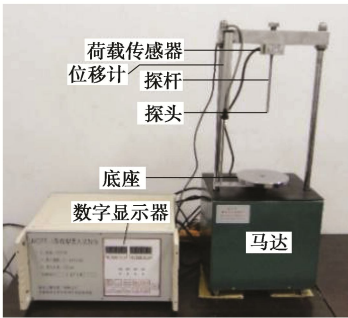
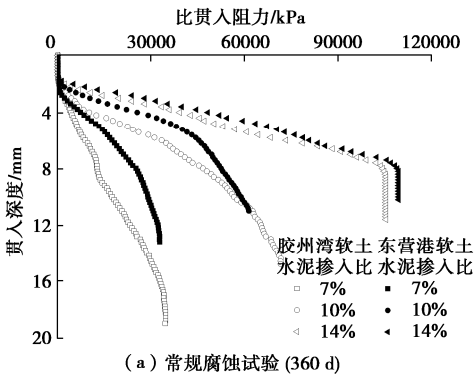


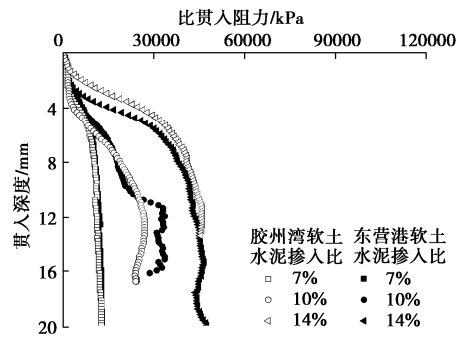
图 3 微型贯入试验仪
Fig. 3 Micro penetration test apparatus

2 劣化深度快速预测方法

微型贯入试验结果如图4所示。加速腐蚀试验与常规腐蚀试验的比贯入阻力曲线性状一致，起始阶段比贯入阻力几乎为0，贯入到一定深度后，曲线开始出现拐点，比贯入阻力随贯入深度线性增加，再次出现拐点后，比贯入阻力最终趋于稳定，说明此时到达水泥土的未劣化区。如图5所示，将比贯入阻力随贯入深度线性增加部分用直线近似，将该直线与贯入深度的交点定义为劣化深度 D 。



(a) 常规腐蚀试验 (360 d)



(b) 加速腐蚀试验 (28 d)
图 4 微型贯入试验结果
Fig. 4 Micro penetration test results

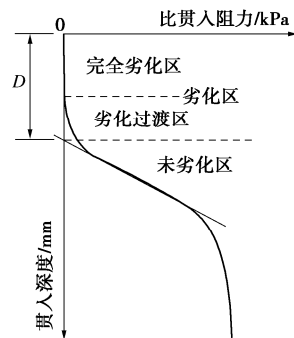


图 5 比贯入阻力曲线示意图及劣化深度定义^[29]
Fig. 5 Schematic diagram of penetration resistance curve and definition of deterioration depth^[29]

图 6 为加速腐蚀试验和常规腐蚀试验结果。加速腐蚀试验的劣化深度 $D_{(3c,28)}$ 与常规腐蚀试验的劣化深度 $D_{(c,360)}$ 相近, 并且存在式 (2) 所示的等效线性关系 (式 (4)), 等效关系系数 α 为 1.08。

$$D_{(c,360)} = 1.08D_{(3c,28)} \quad (4)$$

利用式 (3), (4) 可得

$$D = 1.08D_{(3c,28)} \left(\frac{t}{360} \right)^A \quad (5)$$

式中: D , t , A 同式 (1), 参考刘浩等^[29] 研究结果, 本文 A 取 0.6; $D_{(3c,28)}$ 为浓度为 $3c$ 的人工海水制备的腐蚀土腐蚀水泥土 28 d 时测得与 $D_{(c,360)}$ 等效的劣化深度 (mm); $D_{(c,360)}$ 为常规腐蚀试验腐蚀 360 d 的劣化深度 (mm)。

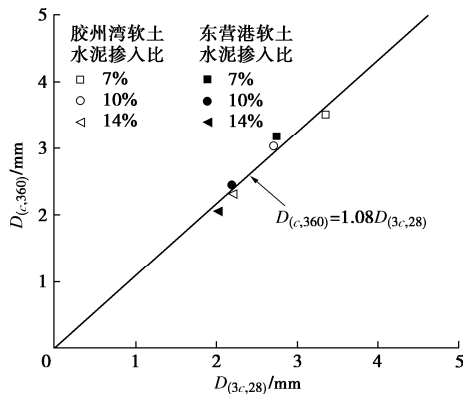


图 6 加速腐蚀试验结果与常规腐蚀试验结果的等效关系
Fig. 6 Equivalent relation between results of accelerated deterioration tests and those of conventional deterioration tests

利用式 (5) 可预测任意腐蚀时间水泥土的劣化深度。

3 劣化深度快速预测方法验证

实施常规腐蚀试验, 利用试验结果验证劣化深度快速预测方法。

3.1 验证快速预测方法的常规腐蚀试验

试验材料、水泥土试样制备方法 & 常规腐蚀试验方法与 1.1, 1.2, 1.4 节相同, 劣化试样制备方案见表 4。

表 4 验证预测方法的劣化试样制备方案

Table 4 Sample preparing schemes for rapid validate prediction methods			
试验用土	水泥掺入比 $a_w/\%$	灰水比 R	腐蚀时间 t/d
胶州湾软土	7, 10, 14	0.3129	90, 180, 720
		0.4694	
		0.6259	
东营港软土	7, 10, 14	0.3248	90, 180, 720
		0.4873	
		0.6497	

3.2 预测结果与试验结果对比

常规腐蚀试验得到的比贯入阻力曲线如图 7, 8 所示, 与图 4, 5 的比贯入阻力曲线性状一致。

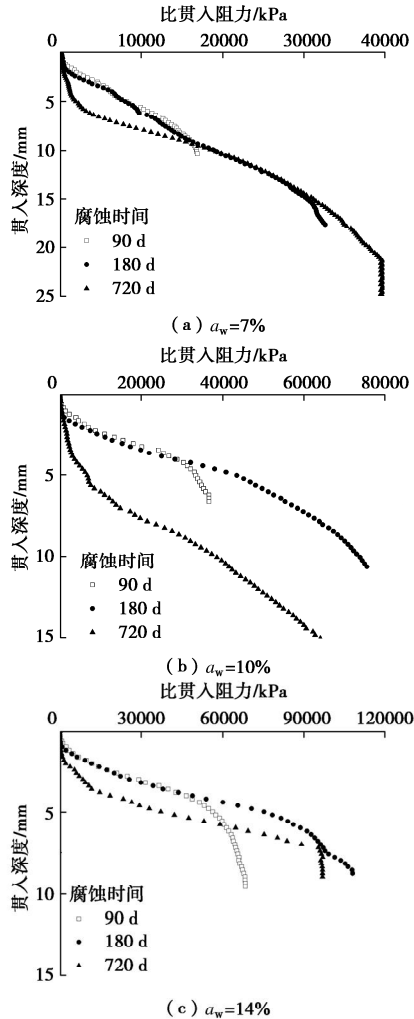


图 7 胶州湾软土常规腐蚀试验试样微型贯入试验结果
Fig. 7 Micro penetration test results of samples of conventional deterioration tests of soft soil in Jiaozhou Bay

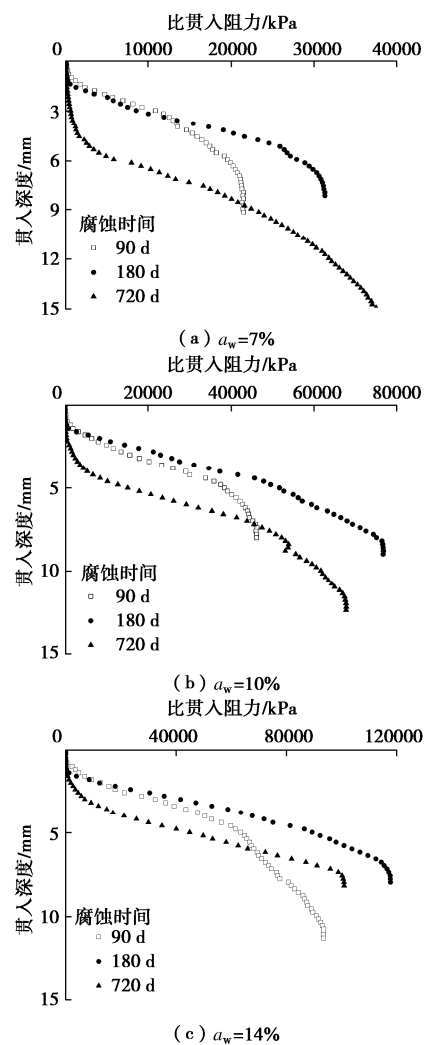


图 8 东营港软土常规腐蚀试验试样微型贯入试验结果

Fig. 8 Micro penetration test results of samples of conventional deterioration tests of soft soil in Dongyin Port

根据图 5 确定劣化深度, 并与式 (5) 预测的劣化深度对比, 如图 9 所示。预测的水泥土劣化深度随腐蚀时间的变化规律和常规腐蚀试验结果基本一致, 表明不同腐蚀介质浓度对水泥水化反应的影响趋势相同, 改变浓度仅影响劣化进程^[31,36]; 利用加速腐蚀试验结果并结合幂函数形式劣化深度预测式构建的水泥固化海相软土劣化深度快速预测方法, 可行且具有实用性。

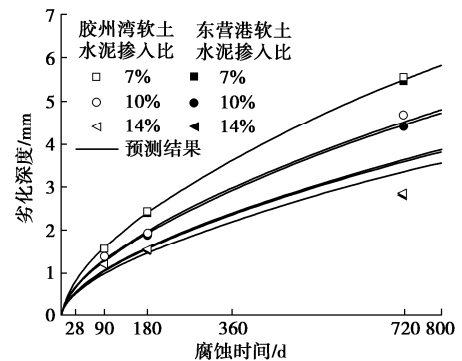


图 9 预测结果与试验结果对比

Fig. 9 Comparison between predicted and test results

4 结 论

本文提出了基于加速腐蚀试验结果的幂函数形式固化土劣化深度快速预测方法, 得到以下3点结论。

- (1) 本文试验条件下, 加速腐蚀试验腐蚀 28 d 的水泥土劣化深度与常规腐蚀试验腐蚀 360 d 的劣化深度存在等效关系, 等效关系系数为 1.08, 即 $D_{(c,360)} = 1.08D_{(3c,28)}$ 。
- (2) 利用 $D_{(3c,28)}$ 与 $D_{(c,360)}$ 的等效关系和幂函数形式的劣化深度预测式, 建立了水泥固化海相软土劣化深度快速预测方法, 预测的劣化深度发展趋势与实测结果较为吻合。
- (3) 基于加速腐蚀试验与常规腐蚀试验结果等效关系构建固化土劣化深度快速预测方法的研究思路, 对于类似腐蚀环境中固化土劣化深度预测研究具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (GONG Xiaonan. Theory of Composite Foundation and its Engineering Application[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese))

[2] 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 Songyu, QIAN Guochao, ZHANG Dingwen. The Principle and Application of Dry Jet Mixing Composite Foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese))

[3] IZUO H, NAKARAI K, KULIK D A. Twenty-two-year investigation of strength development and surface deterioration of cement-treated clay in an in situ field test[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, **134**: 104783.

[4] 武亚磊, 杨俊杰. 土体固化剂: 材料·作用机理·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022: 46-65. (WU Yalei, YANG Junjie. Soil Stabilizer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2022: 46-65. (in Chinese))

[5] 闫楠, 杨俊杰, 刘强, 等. 海水环境下水泥土强度衰减过程室内试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, **50**(11): 115-124. (YAN Nan, YANG Junjie, LIU Qiang, et al. Laboratory test on strength deterioration process of soil cement in seawater environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, **50**(11): 115-124. (in Chinese))

[6] 尚金瑞, 杨俊杰, 董猛荣, 等. 表层劣化对桩承载性状影响的室内模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2):

- 857-861. (SHANG Jinrui, YANG Junjie, DONG Mengrong, et al. Laboratory tests on influences of skin degradation on bearing properties of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 857-861. (in Chinese))
- [7] CUI X Z, ZHANG N, LI S C, et al. Deterioration of soil-cement piles in a saltwater region and its influence on the settlement of composite foundations[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, **30**(1): 04014195.
- [8] 闫楠, 杨俊杰, 董猛荣, 等. 摩擦型桩表面劣化时的沉降特性室内模拟试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, **48**(2): 147-151. (YAN Nan, YANG Junjie, DONG Mengrong, et al. Laboratory model tests on settlement characteristics of friction pile with surface deterioration[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, **48**(2): 147-151. (in Chinese))
- [9] PASTOR J L, ORTEGA J M, CLIMENT M A, et al. Skin friction coefficient change on cement grouts for micropiles due to sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2018, **163**: 80-86.
- [10] PHAM V N, TURNER B, HUANG J S, et al. Long-term strength of soil-cement columns in coastal areas[J]. Soils and Foundations, 2017, **57**(4): 645-654.
- [11] SHINSHA H, TSUTSUMI A. Experimental study on deterioration of cement-mixed soil and crushed particles in seawater[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser C (Geosphere Engineering), 2016, **72**(3): 265-276.
- [12] WU M, ZHANG Y S, JI Y S, et al. A comparable study on the deterioration of limestone powder blended cement under sodium sulfate and magnesium sulfate attack at a low temperature[J]. Construction and Building Materials, 2020, **243**: 118279.
- [13] SHINSHA H, KUMAGAI T. Material properties of solidified soil grains produced from dredged marine clay[J]. Soils and Foundations, 2018, **58**(3): 678-688.
- [14] 董晓强, 苏楠楠, 黄新恩, 等. 污水浸泡对水泥土强度和电阻率特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(7): 1855-1862, 1870. (DONG Xiaoqiang, SU Nannan, HUANG Xin'en, et al. Effect of sewage on electrical resistivity and strength of cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(7): 1855-1862, 1870. (in Chinese))
- [15] 韩鹏举, 白晓红. 无机化合物对水泥土腐蚀的作用机理及试验[J]. 腐蚀与防护, 2013, **34**(5): 381-384. (HAN Pengju, BAI Xiaohong. Experiment and chemical mechanism of corrosive action of inorganic compounds on cemented soil[J]. Corrosion & Protection, 2013, **34**(5): 381-384. (in Chinese))
- [16] 吴燕开, 史可健, 胡晓士, 等. 海水侵蚀下钢渣粉+水泥固化土强度劣化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(6): 1014-1022. (WU Yankai, SHI Kejian, HU Xiaoshi, et al. Experimental study on strength degradation of steel slag + cement-solidified soil under seawater erosion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(6): 1014-1022. (in Chinese))
- [17] 刘松玉, 郑旭, 蔡光华, 等. 活性MgO碳化固化土的抗硫酸盐侵蚀性研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(11): 3057-3064. (LIU Songyu, ZHENG Xu, CAI Guanghua, et al. Study of resistance to sulfate attack of carbonated reactive MgO-stabilized soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(11): 3057-3064. (in Chinese))
- [18] 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 Junjie, SUN Tao, ZHANG Yuechen, et al. Deterioration of soil cement stabilized in corrosive site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(1): 130-138. (in Chinese))
- [19] ASHRAF W. Carbonation of cement-based materials: challenges and opportunities[J]. Construction and Building Materials, 2016, **120**: 558-570.
- [20] 曹智国, 章定文, 彭之晟, 等. 水泥固化铅污染土碳化深度变化规律及预测方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, **51**(4): 631-639. (CAO Zhiguo, ZHANG Dingwen, PENG Zhisheng, et al. Change regularities and prediction method for carbonation depth of cement-stabilized soils contaminated with lead[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, **51**(4): 631-639. (in Chinese))
- [21] 崔新壮, 龚晓南, 李术才, 等. 盐水环境下水泥土桩劣化效应及其对道路复合地基沉降的影响[J]. 中国公路学报, 2015, **28**(5): 66-76, 86. (CUI Xinzhuang, GONG Xiaonan, LI Shucai, et al. Deterioration effect of soil-cement pile under saltwater environment and its influence on composite foundation settlement of road[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, **28**(5): 66-76, 86. (in Chinese))
- [22] JIN Q, CUI X Z, SU J W, et al. Laboratory measurement and analysis of the deteriorated layer permeability coefficient of soil-cement deteriorated in a saline environment[J]. Materials, 2019, **12**(14): 2245.
- [23] KITAZUME M, NAKAMURA T, TERASHI M, et al.

- Laboratory tests on long term strength of cement treated soil[C]// Third International Conference on Grouting and Ground Treatment. New Orleans, 2003.
- [24] MIAO J. Evaluation on Long Term Durability of Cement Stabilized Soils under Seawater Environment[D]. Fukuoka: Kyushu University, 2013.
- [25] CHOMPOORAT T, THEPUMONG T, KHAMPLD A, et al. Improving mechanical properties and shrinkage cracking characteristics of soft clay in deep soil mixing[J]. Construction and Building Materials, 2022, **316**: 125858.
- [26] HAYASHI H, NISHIMOTO S, OHISHI K. Long-term Characteristics on Strength of Cement Treated Soil (Part 1)[R]. Hokkaido: Civil Engineering Research Institute of Hokkaido, 2004.
- [27] 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.
- [28] HARA H, SUETSUGU D, HAYASHI S, et al. Deterioration progress of cement-treated ariake clay under seawater[J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 2014, **63**(1): 49-54.
- [29] 刘 浩, 杨俊杰, 王曼, 等. 水泥土劣化深度-时间关系预测[J]. 长江科学院院报, 2021, **38**(4): 88-93, 101. (LIU Hao, YANG Junjie, WANG Man, et al. Prediction of deterioration depth of cement soil over time[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, **38**(4): 88-93, 101. (in Chinese))
- [30] 闫 楠, 杨俊杰. 海水浸泡下水泥土强度衰减室内试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, **48**(1): 191-202. (YAN Nan, YANG Junjie. Experimental study on strength deterioration process of cement stabilized soil with seawater immersion[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, **48**(1): 191-202. (in Chinese))
- [31] 刘泉声, 柳志平, 程 勇, 等. 水泥土在侵蚀环境中的试验研究和等效分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 1854-1860. (LIU Quansheng, LIU Zhiping, CHENG Yong, et al. Experimental study and equivalent analysis of cemented soil under corrosion environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(7): 1854-1860. (in Chinese))
- [32] 白书麒, 杨俊杰, 李 恩, 等. 劣化水泥土渗透特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, **52**(2): 184-193. (BAI Shuqi, YANG Junjie, LI En, et al. Study on permeability of deteriorated cement-soil[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, **52**(2): 184-193. (in Chinese))
- [33] ZHUTOVSKY S, DOUGLAS HOOTON R. Accelerated testing of cementitious materials for resistance to physical sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2017, **145**: 98-106.
- [34] LI S, YANG J, LIU H, DONG M, WANG M. The accelerated deterioration experiment method of cement soil based on the equivalent relationship between corrosive solution concentration and time[C]// The 8th International Symposium on Project Management. Beijing, 2020.
- [35] HARA H, SUETSUGU D, MATSUDA H, et al. Mechanical property and deterioration rate under seawater of lime and cement stabilized clay containing magnesium salts[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser C (Geosphere Engineering), 2016, **72**(4): 294-299.
- [36] 焦德才, 杨俊杰, 董猛荣, 等. 劣化对水泥土渗透性影响室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 2): 97-100. (JIAO Decai, YANG Junjie, DONG Mengrong, et al. Laboratory tests on effect of deterioration on permeability of cement soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S2): 97-100. (in Chinese))
- [37] 焦德才. 劣化水泥土渗透性及预测研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2019. (JIAO Decai. Study on Permeability and Prediction of Deteriorated Soil[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2019. (in Chinese))
- [38] 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008. (Standard for Engineering Classification of Soil: GB/T 50145—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese))
- [39] TOYOSAWA Y, YANG J J, MIURA S, et al. Bearing capacity of reinforced ground using centrifuge tests[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2004(757): 247-257.