

文章编号:1007-9629(2022)11-1190-05

## 海水环境下镍铁渣粉水泥土的抗渗性能

陈峰<sup>1,\*</sup>, 童生豪<sup>2</sup>, 赖文涛<sup>3</sup>

(1. 福建江夏学院 工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116;  
3. 福建省交通规划设计院有限公司 近海公路建设与养护新材料技术应用交通运输行业研发中心,  
福建 福州 350001)

**摘要:**为研究镍铁渣粉对水泥土渗透性能的影响,采用加压型渗透装置对镍铁渣粉水泥土在清水环境和海水环境下进行渗透试验,并用压汞试验和扫描电镜-能谱分析试验对镍铁渣粉水泥土进行微观分析.结果表明:清水环境和海水环境下镍铁渣粉的掺入均能提升水泥土的抗渗性能,而海水环境下尤为明显;镍铁渣粉掺量超过 20% 后,镍铁渣粉掺量增加对水泥土抗渗性能的影响逐渐变小;镍铁渣粉能发挥微集料效应和活性效应,减小水泥土的最可几孔径和总孔隙率,增强其抗海水侵蚀性能;镍铁渣粉能使水泥土的微观结构更加致密,同时能促进水泥土生成具有低钙硅比的水化产物,增强其抗渗性能.

**关键词:**镍铁渣粉;海水环境;抗渗性能;孔结构;微观结构

中图分类号:TU443

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.11.012

## Impermeability of Cement Soil Mixed with Ferronickel Slag Powder in Seawater Environment

CHEN Feng<sup>1,\*</sup>, TONG Shenghao<sup>2</sup>, LAI Wentao<sup>3</sup>

(1. College of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 3. Research and Development Center of New Material Technology Application for Coastal Highway Construction and Maintenance, Fujian Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** In order to study the effect of ferronickel slag powder on the permeability of cement soil, the permeability of ferronickel slag powder cement soil in clean water environment and seawater environment was studied by a pressurized infiltration device, and the microscopic analysis was carried out by mercury intrusion test and scanning electron microscope-energy spectrum analysis test. The results show that the addition of ferronickel slag powder can improve the impermeability of cement soil in both clean water environment and seawater environment, especially in seawater environment. When the content of ferronickel slag powder is more than 20%, the effect of increasing the content of ferronickel slag powder on the impermeability of soil-cement gradually decreases. The ferronickel slag powder can play a micro-aggregate effect and activity effect, reduce the maximum pore size and total porosity of cement soil, and enhance its resistance to seawater erosion. The ferronickel slag powder can make the microscopic structure of cement soil more compact, and promote the formation of hydration products with low calcium-silicon ratio, and enhance its impermeability.

**Key words:** ferronickel slag powder; seawater environment; impermeability; pore structure; microscopic structure

收稿日期:2022-04-27; 修订日期:2022-05-31

基金项目:国家自然科学基金海峡联合基金资助项目(U1605242);福建省高校产学研联合创新项目(2022Y4002)

第一作者(通讯作者):陈峰(1980—),男,福建福州人,福建江夏学院教授,硕士生导师,博士.E-mail:cfxh@fzu.edu.cn

在软土固化技术中,水泥是使用最为广泛的固化剂<sup>[1]</sup>,尤其在工程止水防渗方面,同时也使得水泥土常处于具有腐蚀性的场地环境中<sup>[2-3]</sup>。因此,近几年有不少学者对水泥土在特定环境下的抗腐蚀性进行了研究。闫楠等<sup>[4]</sup>通过模拟试验研究了海洋环境对水泥土的侵蚀劣化作用。宁宝宽等<sup>[5-6]</sup>揭示了侵蚀环境中的 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 具有衰弱水泥土强度的作用,同时研究了 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 对水泥土侵蚀的作用机理。Chai<sup>[7]</sup>在水泥土中掺入石灰,研究了石灰对其渗透性的影响规律。袁伟<sup>[8]</sup>通过标准环境和海水环境的对比试验,得到了海水环境会导致水泥土渗透性增大和强度下降的规律。陈四利等<sup>[9]</sup>通过化学侵蚀环境的模拟,发现侵蚀环境和pH值对水泥土渗透性能有较大影响。Chew等<sup>[10-11]</sup>采用微观方法,从微细观层面研究了水泥土固化的作用机理。Heineck等<sup>[12]</sup>对遭受到碱性污染物影响的水泥土进行研究,得到了其强度衰减规律。综上,已有学者通过外掺材料来提高水泥土在腐蚀环境下的性能,但利用镍铁渣粉来加强水泥土抗渗性的研究还鲜见报道,且海洋环境下水泥土强度及抗渗性能也未得到应有的重视。因此,本文通过将工业废渣——镍铁渣粉掺入水泥土中,来探讨海水环境下掺镍铁渣粉水泥土的抗渗性能。

## 1 试验

### 1.1 原材料

根据《制盐工业手册》模拟制备人工海水,其主要盐类含量(质量分数,本文涉及的含量、比值等特殊说明外均为质量分数或质量比)见表1。土料取自福州市仓山区竹榄河附近某地铁站的基坑,其为全新统第四系地层长乐组海相沉积层的淤泥,含水率为58.5%,重度为16.01 kN/m<sup>3</sup>,孔隙比(体积比)为1.53。采用福建炼石牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥,该水泥质量符合GB175—2007《通用硅酸盐水泥》的相关规定。高炉镍铁渣粉及粒化高炉矿粉均来自福建源鑫环保科技有限公司,其中 $m$ (镍铁渣粉): $m$ (矿粉)=2:1,混合改良依据及矿物外加剂的化学成分参照文献[13]。试验用水均为经过超纯水机净化后的纯净水。

表1 人工海水的主要盐类含量

Table 1 Main salt content of artificial seawater

							$w/\%$
NaCl	MgCl <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCO <sub>3</sub>	MgBr <sub>2</sub>	Total
27.21	3.81	1.66	1.26	0.86	0.12	0.08	35.00

### 1.2 配合比设计

水泥土的水灰比为0.5,水泥掺入比为15%。以

镍铁渣粉等质量替代水泥,其掺量 $w=0\%$ 、10%、20%、30%、40%,制备的镍铁渣粉水泥土分别记为CS-0(基准组)、CS-10、CS-20、CS-30、CS-40。研究清水环境和海水环境对浸泡龄期 $t=7$ 、28、60、90 d时镍铁渣粉水泥土的抗渗性能。水泥土渗透试验后,取部分水泥土碎块进行龄期为90 d的压汞试验、扫描电镜-能谱分析试验。

### 1.3 试验方法

将48 h后拆模的水泥土试样分别置于清水养护箱和海水养护箱中浸泡养护至设定龄期。渗透试验采用TJSS-25型水泥土渗透装置,试验前采用石蜡对镍铁渣粉水泥土进行密封止水,操作步骤根据JGJ/T 23—2011《水泥土配合比设计规程》进行。温度 $T$  °C下镍铁渣粉水泥土的渗透系数 $K_T$ ,根据达西定律及JGJ/T 23—2011中渗透系数测定要求进行计算:

$$K_T = \frac{V}{iAt} \quad (1)$$

$$i = \frac{p}{100\gamma_w h} \quad (2)$$

式中: $V$ 为渗水量; $i$ 为水力梯度; $A$ 为试样中部的横截面积; $p$ 为渗透压力; $\gamma_w$ 为水的重度,取0.009 8 N/cm<sup>3</sup>; $h$ 为试样高度。

水泥土渗透试验以20 °C为标准温度,对渗透系数 $K_T$ 进行修正:

$$K_{20} = K_T \times \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (3)$$

式中: $K_{20}$ 为水温在20 °C下的水泥土渗透系数; $\eta_T$ 为 $T$  °C下水的动力黏滞系数,符合GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》中的相关规定; $\eta_{20}$ 为20 °C时水的动力黏滞系数。

压汞试验采用PoreMaster 60GT型压汞仪,扫描电镜(SEM)试验采用QUANTA250多功能钨灯丝扫描电镜及其配套的X射线能谱仪(EDS)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 渗透性试验结果分析

清水环境和海水环境下水泥土的渗透系数见图1。采用定基比法,将水泥土的渗透系数与相同环境下对照组的渗透系数进行比较计算,得到其下降率,结果见表2。由图1、表2可见:(1)浸泡龄期为7 d时,水泥土渗透系数均随镍铁渣粉掺量增加而呈下降的趋势,表明其抗渗性能随镍铁渣粉掺量增加而提升,且2种环境下曲线的变化趋势基本相同;当镍铁渣粉掺量 $w=40\%$ 时,2种环境下的水泥土渗透系数相同,

说明早龄期时环境对水泥土抗渗性能的影响不大。(2)浸泡龄期为28 d时,清水环境下水泥土的渗透系数均低于海水环境,这表明水泥土中掺入镍铁渣粉能使其抗渗性能得到增强,而海水环境使其抗渗性能略有降低.其原因在于随着水泥土固化作用的持续进行,镍铁渣粉不仅可以发挥活性作用,而且还起到微集料效应的作用,从而使水泥土更加致密,提升其抗渗性能,但海水环境中侵蚀物质对水泥土的侵蚀作用逐渐增强,导致其抗渗性能劣化,即其渗透系数大于清水环境下.(3)浸泡龄期为60 d时,随着镍铁

渣粉掺量的增加,镍铁渣粉对水泥土抗渗性能的增强效果也增加,但当镍铁渣粉掺量超过20%时,其对水泥土抗渗性能的提升效果略有放缓.海水环境的侵蚀对水泥土抗渗性能具有较强的负面影响,但镍铁渣粉掺量的增加能缓解这种负面影响.(4)浸泡龄期为90 d时,随着镍铁渣粉掺量的增加,水泥土抗渗性能提升较快,但当镍铁渣粉掺量较高时,其增长幅度减缓.综上,镍铁渣粉掺量的增加能大幅提升水泥土的抗渗性能,同时减小海水环境对水泥土的侵蚀作用.下文研究中,水泥土的浸泡龄期均为90 d.

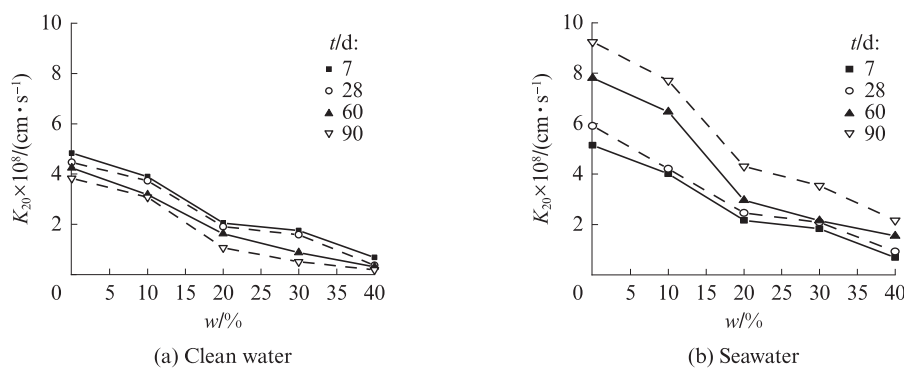


图1 清水环境和海水环境下水泥土的渗透系数

Fig. 1 Permeability coefficient of cement soil in clean water and seawater environment

表2 清水环境和海水环境下水泥土渗透系数的下降率

Table 2 Decrease rates of permeability coefficient of cement soil in clear water and seawater environment

Specimen	Clean water				Seawater			
	7 d	28 d	60 d	90 d	7 d	28 d	60 d	90 d
CS-10	19.25	16.55	25.00	19.58	21.98	28.76	17.16	16.56
CS-20	57.56	57.27	61.56	72.06	57.98	58.38	62.10	53.32
CS-30	63.77	64.43	79.25	86.68	64.40	64.81	72.47	61.69
CS-40	85.92	91.72	92.69	95.04	86.58	84.50	80.28	76.62

## 2.2 压汞试验分析

不同镍铁渣粉掺量下水泥土的孔径( $D$ )分布曲线见图2.由图2可见:浸泡龄期为90 d时,水泥土内部水泥的硬凝作用基本趋于稳定,清水环境下各配合比水泥土孔径曲线的发展趋势基本一致;镍铁渣粉掺量为0%~40%的水泥土最可几孔径分别为60.73、51.41、47.44、42.71、39.79 nm,这表明水泥土抗渗性能随镍铁渣粉掺量增加而提高,这是因为浸泡龄期为90 d时,水泥水化虽然趋于完全,但水泥土内部的镍铁渣粉活性效应仍能发挥较大的作用,使CS-40的最可几孔径较基准组CS-0减小了34.5%;与清水环境相比,海水环境下水泥土的最可几孔径增长幅度较大,且此时CS-40的最可几孔径仍然最小,这与2.1所述CS-40抗渗性最好结果一致.镍铁渣粉的玻璃体在水泥土内

发生似火山灰效应,生成的水化产物使水泥土结构更加致密,降低了水泥土的最可几孔径;水泥土直接暴露在海水环境下时,侵蚀物质(主要为 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ )对水泥土具有较大的侵蚀作用,增大了水泥土的最可几孔径.

浸泡龄期为90 d时,CS-0、CS-10、CS-20、CS-30、CS-40的总孔隙率(体积分数)在清水环境下分别为36.47%、34.28%、33.68%、32.22%、31.19%;海水环境下分别为52.89%、52.43%、41.23%、36.52%、34.81%.由此可见,水泥土的总孔隙率随着镍铁渣粉掺量的增加而减低,同时海水环境的侵蚀也导致其总孔隙率增大.这是由于镍铁渣粉在水泥土中主要起到微集料效应和活性效应,掺入镍铁渣粉可以有效地降低水泥土的孔隙率,使水泥土形成

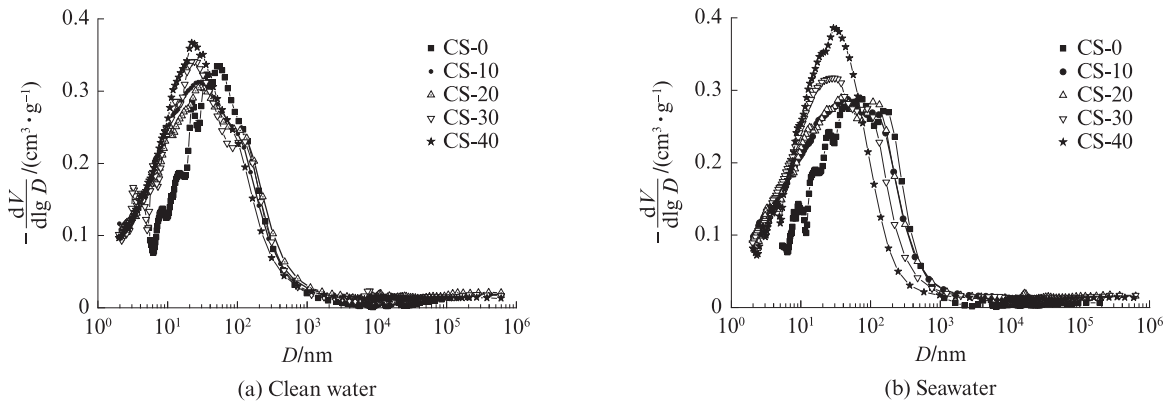


图 2 不同镍铁渣粉掺量下水泥土的孔径分布曲线

Fig. 2 Pore size distribution curves of concrete soil with different contents of ferronickel slag powder

更加致密的结构,提升水泥土的整体性,同时能缓解海水环境的侵蚀.

### 2.3 SEM-EDS 结果分析

海水环境下水泥土的 SEM 及 EDS 图谱见图 3. 由图 3 可见:水泥土中生成了大量的水化产物,以絮凝状水化硅酸钙(C-S-H)凝胶为主,填充了水泥土疏松的孔

隙,并将土颗粒和镍铁渣粉胶结在一起,形成空间镶嵌的整体;水泥土中还出现了较多易识别的六方板状、层状结构,其可能为氢氧化钙(CH)晶体或 Friedel's(F)盐晶体;六方板状、层状结构随着镍铁渣粉掺量的增加而增多,且掺入镍铁渣粉能增强水泥土对 Cl<sup>-</sup> 的结合能力,因此六方板状、层状结构为 F 盐晶体的可能性较大.

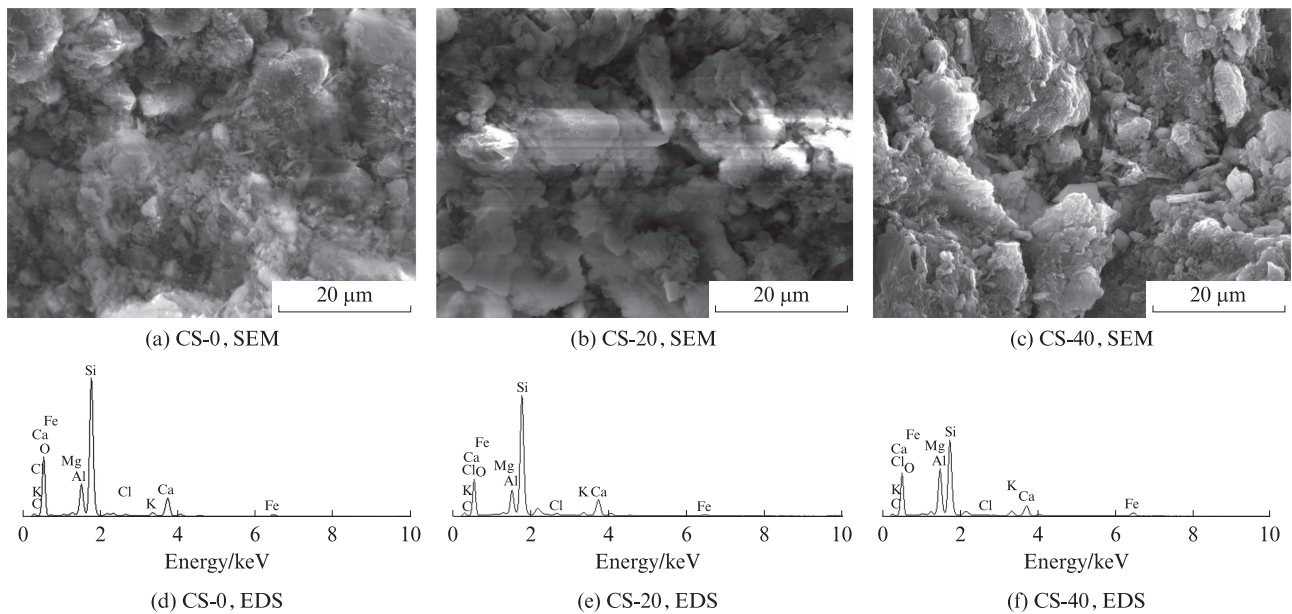


图 3 海水环境下水泥土的 SEM 及 EDS 图谱

Fig. 3 SEM images and EDS spectra of cement soil in seawater environment

结合 EDS 能谱图可知,水泥土中 O、Si 元素含量较多,这与水泥土中存在较多 C-S-H 凝胶情况一致.海水环境中的 Cl<sup>-</sup> 能与铝酸三钙(C<sub>3</sub>A)及溶解的 CH 反应生成 F 盐晶体,而掺入镍铁渣粉可以促进这一反应.海水环境侵蚀后水泥土中检测出大量的 Cl 元素,再次证明 Cl 对水泥土的水化过程具有一定影响.随着镍铁渣粉掺量的增加,水泥土中 Cl 元素的含量均略有增大,这表明镍铁渣粉的掺入使水泥土对 Cl<sup>-</sup> 的结合能力增强.浸泡龄期为 90 d 时,CS-0、

CS-20、CS-40 的钙硅比(摩尔比)分别为 0.97、0.94、0.41,这是因为随着侵蚀时间的增加,渗入到结构内部的 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 等侵蚀离子含量逐渐增加,含量较大的侵蚀离子能生成钙硅比较大的 C-S-H 凝胶.水泥土的钙硅比随着镍铁渣粉掺量的增加而降低,这表明其抗渗性能有所提高.在海水的影响下,水泥土中不但会生成较为疏松的 C-S-H 凝胶,而且侵蚀离子会与活性矿物生成大量的膨胀性钙矾石(Aft)、F 盐、石膏,当其生成量达到一定值时,会破

坏水泥土的整体性,并对水泥土的抗渗性能产生不良影响。

### 3 结论

(1)水泥土中掺入镍铁渣粉能提升其抗渗性能。随着镍铁渣粉掺量的增加,水泥土的渗透系数逐渐减小;当镍铁渣粉掺量超过20%后,对水泥土抗渗性能的增强效果变缓,即镍铁渣粉掺量增加对水泥土抗渗性能的影响变小。

(2)海水环境对水泥土抗渗性能的劣化作用主要表现在浸泡龄期28d以后。海水环境下的渗透系数明显大于清水环境下的渗透系数,而水泥土中掺入镍铁渣粉能减缓海水环境对其抗渗性能的劣化。

(3)由压汞试验结果可知,掺入到水泥土的镍铁渣粉能发挥出微集料效应和活性效应,随着镍铁渣粉掺量的增加,水泥土的最可几孔径逐渐减小,总孔隙率逐渐减小,水泥土基体更加密实。因此镍铁渣粉能明显缓解海水环境对水泥土孔隙结构的劣化,提高其抗渗性能。

(4)结合SEM和EDS对镍铁渣粉水泥土的微观形貌分析可知,浸泡龄期为90d时,水泥土中的水化产物大幅度增加,水化产物有效地将土颗粒和镍铁渣粉粘结为一体,结构较为密实。同时,海水环境对水泥土的影响较为显著,使得水泥土的形貌结构更为疏松,钙硅比增大,导致水泥土的抗渗性能降低。

### 参考文献:

- [1] 俞家人,陈永辉,陈庚,等.地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析[J].建筑材料学报,2020,23(2):364-371.  
YU Jiaren, CHEN Yonghui, CHEN Geng, et al. Mechanical behaviour of geopolymer stabilized clay and its mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):364-371. (in Chinese)
- [2] 张经双,段雪雷,吴倩云,等.氯盐-干湿循环耦合作用下水泥土的力学性能[J].建筑材料学报,2021,24(3):508-515,550.  
ZHANG Jingshuang, DUAN Xuelei, WU Qianyun, et al. Mechanical properties of cement soil subject to coupling effect of chloride salt solution and dry-wet cycles [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):508-515,550. (in Chinese)
- [3] 陈四利,杨雨林,张精禹.污水环境对水泥土力学性能的影响试验研究[J].土木建筑与环境工程,2015,37(4):112-117.  
CHEN Sili, YANG Yulin, ZHANG Jingyu. Experimental analysis of effects of polluted water environment on mechanical properties of cemented soil [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2015, 37(4):112-117. (in Chinese)
- [4] 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]. Journal of Civil Engineering, 2017, 50(11):115-124. (in Chinese)
- [5] 宁宝宽,陈四利,丁梧秀,等.环境侵蚀下水泥土的强度及微观破裂过程分析[J].岩土力学,2009,30(8):2215-2219.  
NING Baokuan, CHEN Sili, DING Wuxiu, et al. Analysis of meso-fracture process of cement soil under environmental erosion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8):2215-2219. (in Chinese)
- [6] 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 and Protection, 2013, 34(5):381-384. (in Chinese)
- [7] CHAI J C, QUANG N D. Permeability of lime- and cement-treated clayey soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(9):1-7.
- [8] 袁伟.海水环境对水泥土渗透性和强度的影响及机理分析[D].青岛:中国海洋大学,2012.  
YUAN Wei. Effect of seawater condition on permeability and strength of cement-treated soil and mechanism analysis [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese)
- [9] 陈四利,杨雨林,周辉,等.污水环境对水泥土渗透性能影响的试验研究[J].岩土力学,2015,36(11):3047-3054.  
CHEN Sili, YANG Yulin, ZHOU Hui, et al. Effect of sewage environment on permeability of cemented soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11):3047-3054. (in Chinese)
- [10] 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, 2004, 130(7):696-706.
- [11] OUHADI V R, YONG R N. Impact of clay microstructure and mass absorption coefficient on the quantitative mineral identification by XRD analysis [J]. Applied Clay Science, 2003, 23(1-4):141-148.
- [12] HEINECK K S, LEMOS R G, LAUTENSCHLAGER C E R, et al. Behavior of vertical hydraulic barriers composed by sandy soil, bentonite, and cement subjected to alkaline contaminants [C]// Proceedings of Geoflora. Florida: Advances in Analysis, Modeling and Design, 2010:2462-2471.
- [13] 陈峰,童生豪.海洋环境下复合镍铁渣粉水泥土的强度劣化研究[J].水力发电学报,2020,39(10):102-109.  
CHEN Feng, TONG Shenghao. Study on strength degradation of soil-cement mixed with composite ferronickel slag powder in marine environment [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(10):102-109. (in Chinese)