

引用格式: 闫楠, 郑晨. 水泥土加固体的劣化特性研究进展[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(20): 12-20

Yan Nan, Zheng Chen. Research progress on cement stabilized soil degradation characteristics [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(20): 12-20

建筑科学

# 水泥土加固体的劣化特性研究进展

闫楠<sup>1</sup> 郑晨<sup>2</sup>

(青岛大学环境科学与工程学院<sup>1</sup>, 青岛 266071; 青岛理工大学土木工程学院<sup>2</sup>, 青岛 266033)

**摘要** 水泥土加固体因其优秀的抗压强度、就地取材成本低廉、施工方法简便等优点成为改良软土地基最为常见的方法。但因环境污染或地下土层本身具有腐蚀性等原因, 水泥土加固体劣化问题受到人们重视。为此对水泥土加固体强度增长机理、劣化机理、影响劣化深度的因素、渗透性变化等方面的研究进行归纳总结, 对有关水泥土加固体劣化问题研究不足之处进行讨论, 为水泥土加固体未来研究方向提出展望。

**关键词** 水泥土加固体 软土地基 劣化 强度衰减 渗透性  
**中图分类号** TU473; **文献标志码** A

中国幅员辽阔, 各地区广泛分布着软土层, 天然的软土地基受力后不均匀变形大, 沉降稳定历时长, 很难满足建(构)筑物对地基稳定性、渗透性等方面的要求。随着中国现代化进程的加速, 扩张的城市建设要求建筑从业者们最大限度地利用原土, 改良软土地基<sup>[1-5]</sup>。水泥土便是利用机械搅拌和射流冲切, 就地物理力学性能不佳的软土与水泥固化剂混合形成的加固体<sup>[1, 6, 7]</sup>。水泥土加固体因具有整体性强、设计灵活、施工方便、噪声小、造价低和引起的附加沉降小等优点, 被作为建(构)筑物复合地基、防渗止水帷幕、支挡结构物等广泛应用于陆地和水利工程。特别是随着跨海大桥、海底隧道、港口和海岸工程规模的扩大, 以水泥土为代表的地基处理方法在中国东南沿海地区的建设工程中也发挥着不可替代的作用<sup>[8-15]</sup>。

伴随科技发展的同时, 人类对地下水、地下土层的污染导致许多地基土具有一定的腐蚀性, 长期处于腐蚀场地中的水泥土会在侵蚀性介质的作用下发生强度衰减、渗透性增大、有效加固范围缩小等劣化现象, 能够明显降低水泥土的力学性能和耐久性, 缩短水泥土的服役寿命<sup>[16-21]</sup>。日本学者 Ikegami 等<sup>[22]</sup>通过研究某滨海场地中龄期 20 年的大型水泥

土发现, 其表层强度在 30 ~ 50 mm 发生明显的衰减现象。基于此, 从水泥土加固体的劣化机理、加速劣化的影响因素、渗透特性等几个方面对近年来有关水泥土加固体劣化研究进行总结, 并对水泥土加固体未来研究方向提出展望。

## 1 水泥土加固体简介

### 1.1 水泥土加固体发展概况

水泥土加固体是在水泥与水、外加剂一起搅拌的同时加入大量原地基土, 经过一系列物化反应使地基土凝结成具有一定抗剪强度、水稳定性的坚硬固体<sup>[6, 7]</sup>。在 20 世纪 40 年代末, 美国相关部门就对水泥土进行明确定义并制定了相关应用规范<sup>[23]</sup>。中国水泥土加固体作为建筑物桩基应用发展较晚, 在 20 世纪多用于加固局部土基作为路面基层材料及水库等工程防渗衬砌材料。至 20 世纪 90 年代中期, 中国逐渐引入水泥土加固体增强地基强度的方法, 在地基处理中开始使用水泥土搅拌桩或水泥土加固体整体地基<sup>[24-30]</sup>。

### 1.2 水泥土加固体强度提高机理

关于水泥土加固体强度提升的原因, 中国国内外专家学者进行大量实验并论证。李文斌<sup>[31]</sup>提出水泥土加固体强度主要来源于水泥水化产物的碳化作用。Bell<sup>[32]</sup>、Gotoh<sup>[33]</sup>认为水泥在水泥土加固体中水化产生的胶凝物是增加水泥土强度的主要原因。现如今业内普遍认为水泥土加固体强度提升是因在水泥与地基原状土搅拌过程中水泥逐渐进行水

2019年3月18日收到 国家自然科学基金项目(51809146)、山东省重点研发计划项目(2018GSF117008)、山东省自然科学基金项目(ZR2017PEE006)资助  
第一作者简介: 闫楠(1982—), 女, 山东潍坊人, 博士, 讲师。  
E-mail: yannan0527@163.com.

化反应,生成不同结晶程度的水化硅酸钙、水化硫铝酸钙、碳酸钙凝胶,凝胶在继续硬化的过程中与土颗粒相结合,使原本松散的土颗粒互相凝结成一个坚硬的整体<sup>[34-38]</sup>。

### 1.3 水泥土加固体劣化问题分类及研究思路

由于环境的恶化、工业污染的加剧、农业灌溉的不科学、生活垃圾的增多及海水入侵等原因致使许多地基土逐渐具有腐蚀性;以滨海相沉积软土和滨海相吹填土为代表的滨海场地也具有不同程度的腐蚀性,以上可统称为腐蚀场地<sup>[1-3, 39, 40]</sup>。杨俊杰等<sup>[25]</sup>根据原土腐蚀性形成的原因及工程性质的不同,将水泥土加固体的劣化问题分为两大类:在非腐蚀场地形成的加固体经过一定时间后,因场地环境受到污染,如受到工业废水废渣等改变场地性质而引起的劣化问题(第一类劣化问题)和原本就具有腐蚀性的场地,如天然土壤含盐量较高或土体 pH 偏低等形成的水泥土的劣化问题(第二类劣化问题)。图 1 为杨俊杰等<sup>[41]</sup>提出的两类劣化问题的分类及其室内实验研究思路。

为了研究在非腐蚀场地形成的加固体因场地受到污染发生改变而引起的劣化问题(第一类劣化问题),目前专家学者大多采用将标准养护一定时间后,已具有一定强度的加固体再放置于室内腐蚀环境中的养护方式对水泥土加固体进行室内模拟研究试验。但是在实际工程腐蚀场地中形成的加固体,如水泥土深层搅拌桩等,在加固体形成的同时就与环境中的腐蚀介质接触,其强度增长过程亦是在腐蚀场地中进行的。因此,室内模拟研究第二类劣化问题的关键是保证加固体制备后可立即与腐蚀环境接触,使其更为接近工程实况。已有研究表明<sup>[2, 13]</sup>,水泥土与腐蚀环境接触前已具有的初始强度对水泥土的强度衰减规律有很大影响,预先标准养护时间越长,水泥土的初始强度越大,在腐蚀环境中的劣化深

度越小。由此可见,两类劣化问题的强度衰减过程存在差异。

## 2 水泥土加固体劣化问题研究进展

### 2.1 水泥土加固体劣化机理研究

长期处于腐蚀场地中的水泥土会在侵蚀性介质的作用下发生强度衰减、渗透性增大、有效加固范围缩小等劣化现象,能够明显降低水泥土的力学性能和耐久性,缩短水泥土的服役寿命<sup>[1-5]</sup>。形成于各种腐蚀场地,尤其是滨海相吹填土、滨海沉积软土等场地中水泥土的劣化现象已被现场调查结果所证实。国内外学者通过力学性能测试、扫描电镜分析、X 射线衍射分析、化学分析等试验手段,从宏观、微观方面对水泥土的劣化过程和机理进行了研究。

水泥土表层发生劣化后,由于水泥土进入内部的侵蚀性离子与其所处腐蚀环境存在浓度差,导致侵蚀性离子透过劣化层继续向水泥土内部扩散,与未劣化层的水泥土接触并发生反应。深入水泥土加固体内部的侵蚀性离子直接消耗水泥水化产物,降低了水泥土内部环境的 pH,促使水化产物中  $Ca^{2+}$  溶出。 $Ca^{2+}$  的溶出能够导致水泥土加固体孔隙增、渗透性增大、水泥土强度降低,而且溶出反应生成的  $Mg(OH)_2$ 、 $M-S-H$ 、 $M-A-H$ 、 $C_3A \cdot CaCl \cdot nH_2O$  等物质又会影响水泥土的固化反应,抑制水泥土强度的增长。

Ikegami 等<sup>[22]</sup>、Kitazume 等<sup>[42]</sup>通过压汞法测量随劣化深度变化水泥土加固体不同位置孔隙分布的特征,证实场地环境中  $Ca^{2+}$  含量与水泥土加固体强度变化趋势一致,证实  $Ca^{2+}$  是水泥土强度形成的主要因素。此外,裴向军等<sup>[43]</sup>、杨晓明<sup>[44]</sup>、乔宏霞等<sup>[45]</sup>、王军等<sup>[46]</sup>研究提出海水对水泥土的侵蚀是经过一系列的物理化学反应后,水泥土中的 Ca 不断析出致使水泥土的孔隙结构发生改变,出现了孔洞。由以上文献可知,水泥土等加固体在强度衰减过程中发生了

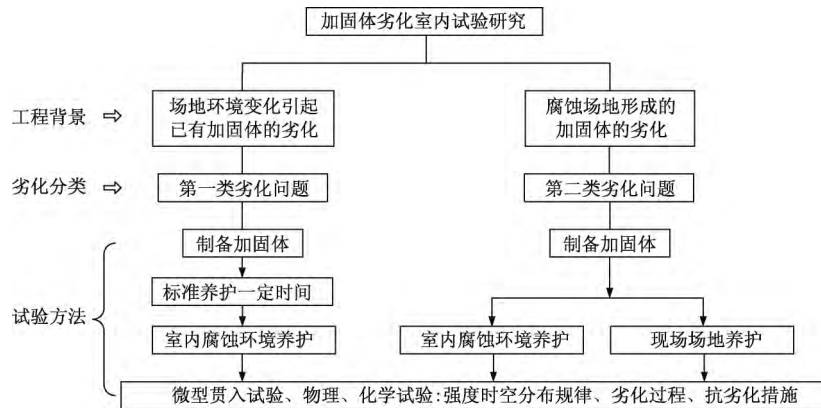


图 1 文献[41]中水泥土加固体劣化问题的分类及研究思路

Fig. 1 Deterioration classification and research thought of the deterioration of cement soil solidification of literature in Ref. [41]

Ca 淋溶现象, Ca 从加固体中扩散到周围环境, 导致加固体表层劣化, 而 CaO 含量的分布与强度的分布一致。

除  $\text{Ca}^{2+}$  存在导致水泥土加固体发生固化外, 腐蚀环境中较高浓度的  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  等侵蚀性离子在水泥土加固体水化反应时消耗水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 从而延迟加固体水化的进程。而且  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  等侵蚀离子水化生成物与水泥水化产物相比胶凝性差, 附着在加固体中散结土颗粒及水泥水化产物表面, 阻碍黏土矿物与水化产物的吸附和离子交换以及凝硬反应, 继续阻碍水泥土加固体强度增长。赵永强<sup>[47]</sup>、韩鹏举等<sup>[48]</sup>采用硫酸溶液对水泥土加固体进行浸泡, 试验结果表明  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度直接影响了水泥土强度的变化趋势, 并且与水泥土加固体中水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应, 生成具有膨胀性的物质, 产生应力, 促使裂纹发展, 最终导致了水泥土的破坏。刘泉声等<sup>[49]</sup>采用不同组分的化学溶液和海水对不同水泥土试样的短时和长时浸泡, 并通过无侧限抗压强度试验、扫描电镜和离子色谱测试, 研究了水泥土强度和微观结构随侵蚀时间和浸泡溶液浓度的变化规律, 结果表明, 浸泡过程中, 溶液中离子的迁移速度  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^-$ , 溶液浓度越大, 离子迁移速度越大, 时间越长, 离子迁移速度越小; 各种不同化学溶液在短时间内对水泥土强度的影响程度不同, 但长期来看, 都对水泥土具有侵蚀作用。

闫楠等<sup>[50]</sup>探究天然海水对水泥土加固体劣化作用机理, 提出采用滨海相软土制备水泥土加固体的强度衰减过程主要分为腐殖质抑制水泥土加固体

硬化过程中强度增加及促使水泥土加固体由表层向深处发生劣化现象, 如图 2 所示。

水泥土强度的衰减过程实质上是侵蚀性物质参与水泥土固化反应, 进而与不同养护时间的水泥土发生物理化学反应的结果, 即劣化机理在不同时间的表现。所以, 水泥土强度与其在时间和空间上的发展规律密切相关, 而目前关于此方面的研究较少, 应在未来对此方面着重进行研究。

## 2.2 水泥土加固体发生劣化影响因素

水泥土加固体在搅拌逐渐固化而强度增加受到很多因素制约, 同理可知水泥土加固体发生劣化亦是一个复杂的、受到许多因素制约的物化过程。影响水泥土劣化的因素可分为内因和外因<sup>[41]</sup>, 内因是影响加固体强度的内在因素, 包括土体性质、水泥种类、标号及掺入比、加固体自重应力状态、施工工艺等; 外因是指外界环境因素, 包括环境温度、侵蚀性离子的种类及浓度、加固体受到的有效土压力和孔隙水压力等。

### 2.2.1 土的性质对劣化影响

不同的土质具有不同的颗粒级配、颗粒形态、矿物成分等物理性质, 混合搅拌形成的水泥土加固体强度差别也较大, 在腐蚀环境中加固体劣化速率也大为不同。张树彬等<sup>[51]</sup>利用灰色关联理论方法对不同颗粒级配土对水泥土加固体强度及劣化表象影响进行探究, 试验结果表明土体颗粒越小水泥土加固体强度越大, 越不易发生表面劣化现象。艾志伟等<sup>[52]</sup>年提出在用淤泥质土制备水泥土加固体时掺入 10% ~ 20% 砂与水泥一起混合搅拌可有效降低其劣化速率。

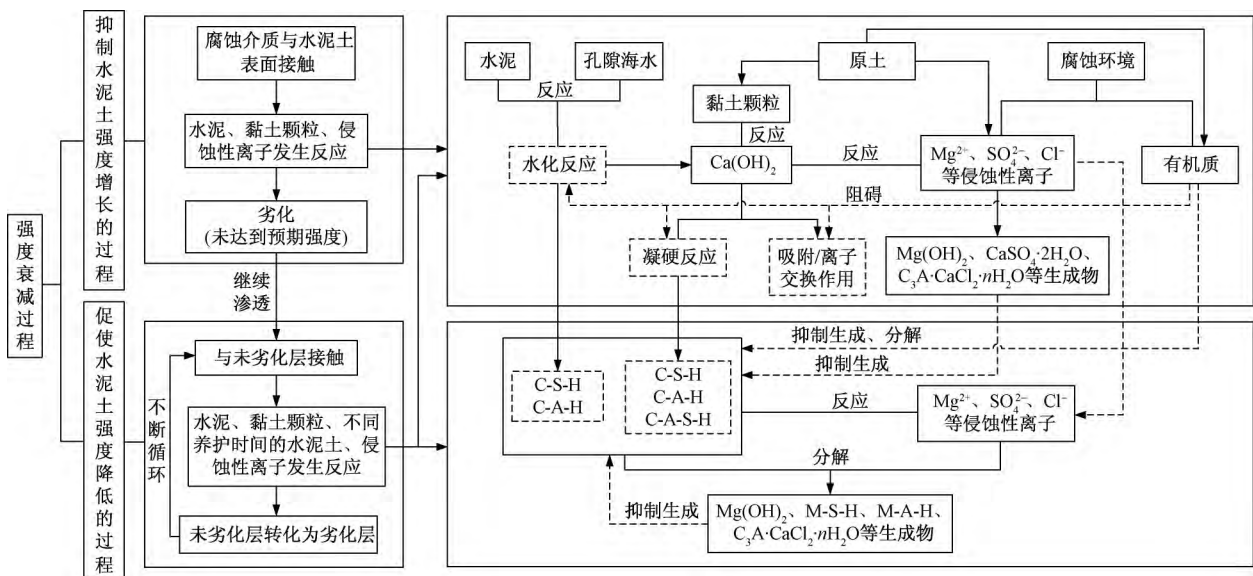


图 2 文献 [50] 中滨海相软土制备水泥土强度的衰减过程

Fig. 2 Deterioration process of cement soil from marine soft soil Ref. [50]



原状土中有机质种类与含量的不同对水泥石加固体强度及劣化深度的影响较大。因土壤中有有机质的主要组成部分是腐殖酸,腐殖酸中富里酸对水泥水化过程造成延缓,胡敏酸使土中黏粒更加分散不利于后续物质团聚硬化,所以一般随着原状土中有机质含量增加水泥石加固体强度下降,更易出现劣化的现象。范昭平等<sup>[53]</sup>对有机质含量不同、水泥石掺入比不同的淤泥加固土开展无侧限抗压强度试验,研究了有机质含量和水泥石掺量对水泥石强度的影响规律。研究发现,有机质含量对于水泥对淤泥的固化效果有较大影响,淤泥中的有机质含量存在 4.3% 的界限值,当超过此值时,有机质含量的增加不再对水泥石的固化效果产生更不利的影响。张树彬等<sup>[54]</sup>对水泥加固有机质土的腐殖质酸组分进行红外光谱分析。结果表明,增加水泥环境中胡敏酸组分的羧基量后,随水泥掺入量的增加,水泥石中阳离子的交换量增加。灰度关联分析结果证明,富里酸对水泥石无侧限抗压强度影响最大。有机质中的腐殖酸组分可与水泥水化产物中的  $\text{Ca}^{2+}$  结合生成较为稳定的结晶化合物,在一定程度上阻碍了水泥的水化反应,影响水泥石强度生成,削减水泥的加固效果。刘泉声等<sup>[55]</sup>对比由砂土制备水泥石加固体与由淤泥质土制备水泥石加固体在侵蚀溶液浸泡 28 d 后无限侧压强度,试验结果表明相同条件下含有有机质较多的淤泥质水泥石更易发生劣化。

### 2.2.2 水泥种类对劣化影响

水泥石加固体中不同水泥掺入量、水泥种类、水泥水灰比、外加剂都会对其强度发展及劣化造成影响。设计水泥石加固体中水泥掺入量时按式(1)计算:

$$a_w = \frac{m_c}{m_s(1+w)} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中:  $a_w$  为水泥石中水泥掺入比,%;  $m_c$  为水泥石中掺入水泥的质量 g;  $m_s$  为水泥石中掺入干燥土的质量 g;  $w$  为土的含水率,%。

Ficher 等<sup>[56]</sup>、Lee 等<sup>[57]</sup>、李灿等<sup>[58]</sup>对比不同水泥掺入量水泥石加固体强度后提出,水泥掺入量在 7% ~ 20% 时既可保证水泥石加固体强度符合工程要求,又可节约工程成本。闫楠等<sup>[59]</sup>综合考虑水泥掺入比、水泥强度等级、水灰比等因素,利用 BP (back propagation) 神经网络模型对水泥石加固体在腐蚀环境中劣化深度进行预测,不同侵蚀时间下不同水泥掺入比的水泥石劣化深度变化与预测对比如图 3 所示。试验结果表明水泥掺入量越大水泥石加固体越不易发生劣化现象,BP 神经网络模型可有效

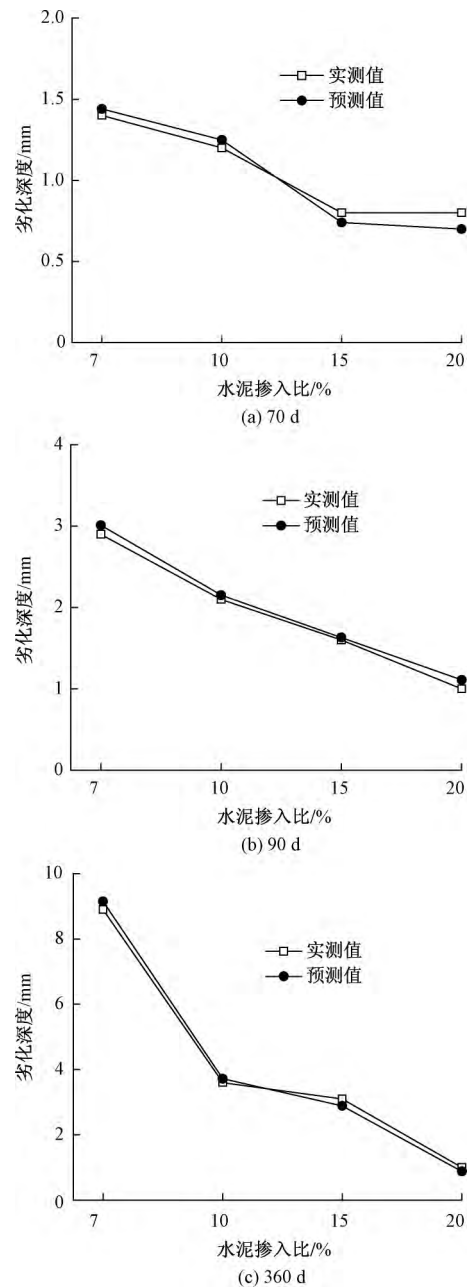


图3 文献[59]中不同养护时间劣化深度预测结果与试验结果比较

Fig. 3 Comparison of prediction results with testing results of different curing time in Ref. [59]

对水泥石加固体劣化深度进行预测,为水泥石地基建筑物设计提供新型安全性验证方法。

王达爽等<sup>[60]</sup>探究不同水灰比及水泥掺入量对水泥石加固体强度的影响,分析提出水泥石加固体强度水泥掺入量呈正相关且在水泥石中含水量接近土样液限时水泥石强度达到最大值,将水灰比与初始密度之比作为参数建立如式(2)所示水泥石加固体强度预测模型,经验证该公式预测结果与试验实测值较为吻合。与储诚富等<sup>[61]</sup>研究结果一致。

$$q_u = K_{28} (0.362 \ln T - 0.1626) \left( \frac{R}{\rho_i} - \frac{R_{28}}{\rho_i} \right) \quad (2)$$

式(2)中:  $q_u$  为水泥土加固体强度;  $K_{28}$  为水泥土养护 28 d 龄期拟合直线斜率;  $R/\rho_i$  为水灰比与初始密度之比;  $R_{28}/\rho_i$  为 28 d 龄期强度为 0 时水灰比与初始密度比值。

### 2.2.3 外界环境因素对劣化影响

水泥土加固体固化与水泥类似,是一个长期且复杂的过程,而水泥土的养护环境条件即其所处环境温度、侵蚀离子种类与数量、附加应力等都会对水泥土强度及劣化深度造成不同程度的影响。杨俊杰等<sup>[41]</sup>通过室内模拟试验初步探讨了室内海水环境下养护时间、水泥掺量和海水压力对场地形成的水泥土强度的影响,结果表明养护在海水环境中的水泥土劣化速率较快;水泥土劣化深度与养护时间、海水压力、水泥掺入比成正相关增长;劣化深度越深的水泥土加固体中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度越小,成反比例,证实劣化的发生与  $\text{Ca}^{2+}$  的溶出有关。

目前国内外多采用将标养成型后的水泥土置于腐蚀环境的方式模拟研究水泥土的劣化问题,水泥土在接触腐蚀环境前已具有一定强度。杨俊杰等<sup>[62]</sup>提出在实际工程中,腐蚀场地形成的水泥土,如腐蚀地基中的深层搅拌桩,并未经标准养护便与腐蚀介质接触,所以为模拟现场环境,水泥土不应预先进行标准养护。已有研究表明<sup>[10,13]</sup>,水泥土的初始强度(接触腐蚀环境之前形成的强度)对水泥土的劣化规律有较大影响。

与水泥养护所不同的是,水泥土加固体时间这一因素在水泥土劣化过程中定义比较模糊,既包括强度增长的龄期,又包括水泥土与腐蚀介质接触的时间,但由于试样制备后其龄期与劣化时间不同步,时间因素被分割开来。闫楠等<sup>[63]</sup>针对第二类劣化问题采用天然海水作为腐蚀介质对水泥土浸泡养护不同时间后对其进行微型灌入试验及 SEM、离子滴定等检测,试验顺序如图 4 所示。

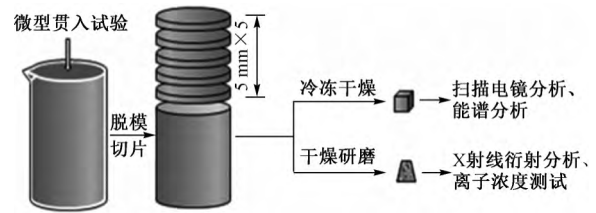


图 4 试验实施顺序<sup>[63]</sup>

Fig. 4 Test order<sup>[63]</sup>

试验结果表明水泥土劣化深度随海水养护时间的增加而增加,对水泥掺入比为 15% 养护 360 d 水泥土选取距表层不同深度试样进行电镜扫描,结果如图 5 所示。在距表层 0~10 mm 深度处水泥土加固体试件孔隙明显且分布较多,10 mm 以下土层孔隙不明显多为纤维状及网状结构。由此可知水泥土加固体发生劣化作用后由表层孔隙逐渐向内渗透,由表及里发生侵蚀现象,使水泥土加固体逐步变成非均质体。

### 3 水泥土加固体渗透性问题的研究进展

在软土地基土中掺入水泥不仅可以填充原状土中大量孔隙减少原状土初始损伤度,增强土样强度,还可以在在一定程度上填充土层中渗流通道,降低其渗透系数。Terashi 等<sup>[64]</sup>、叶书麟等<sup>[65]</sup>、侯永峰等<sup>[66]</sup>、董邑宁等<sup>[67]</sup>研究表明水泥土加固体渗透系数随水泥掺入比、龄期的增大而减小。但水泥土加固体长期处于腐蚀场地中将发生加固体强度降低、有效直径减小、孔隙增多、渗透性增大等劣化现象。目前国内外学者对不同土体及其固化土的渗透性进行了大量的对比研究。

徐超等<sup>[68]</sup>研究了原材料性质和龄期对水泥-膨润土泥浆固结体渗透性能的影响。结果表明,膨润土对固结体渗透性的影响依赖于水泥用量,只有达到一定的水泥用量后,膨润土用量的增加才能有效降低固结体的渗透性能;固结体的渗透系数随龄期

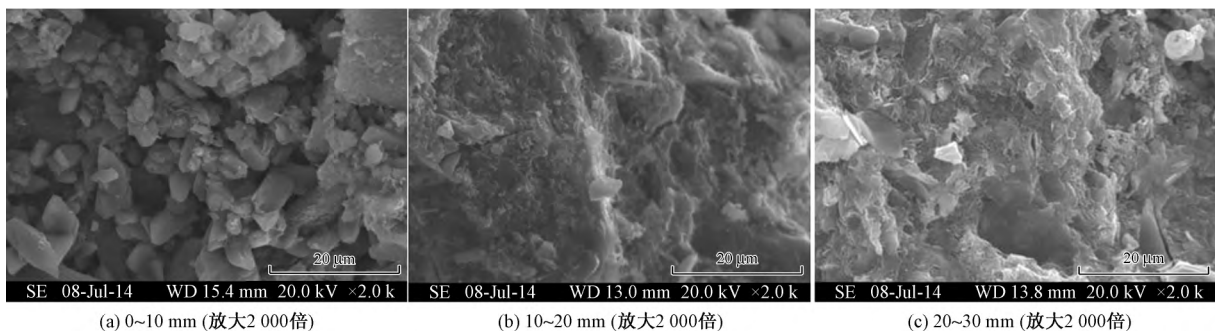


图 5 文献[63]中不同深度下水泥土加固体 SEM 图

Fig. 5 SEM of cement stabilized soil at different depths in Ref. [63]

明显降低。

多数学者使用经过标准养护或类似标准养护后的水泥土试样实施渗透试验研究水泥土渗透性与水泥掺入比、龄期及添加剂的关系。针对场地形成的水泥土的渗透性,杨俊杰等<sup>[69]</sup>通过将制备好的水泥土试样不经过标准养护直接进行渗透试验的方式,研究粉土水泥土的渗透系数随龄期的变化规律;为了研究第二类劣化中加固体的渗透性问题,对经过标准养护和海水养护的水泥土试样实施渗透试验,得到水泥土的渗透系数与龄期的关系。结果表明,标准养护条件下水泥土的渗透性随水泥掺量和龄期的增加而减小,而海水条件下水泥土的渗透性随龄期呈增大趋势,其数值的数量级为 $10^{-8}$  cm/s;对于非腐蚀场地形成的水泥土,水泥掺量越大,时间越长,水泥土的渗透性越低。杨俊杰提出对水泥土加固体不经养护直接进行试验的方法得到业内的普遍认可,认为该方法在更加符合实际工程情况下可有效提升试验准确度。

以上研究成果显示,因水化反应和火山灰反应产物的形成,使得水泥土的孔隙变小,与原土相比水泥土的渗透性明显降低。但Chew等<sup>[70]</sup>和Lorenzo等<sup>[71]</sup>的研究结果显示加固后水泥土的渗透性有所增大,这可能是由于他们试验中采用水泥浆制备试样,增加了水灰比,致使孔隙增加,渗透性增大<sup>[1]</sup>。可见,水泥土的渗透性与其孔隙大小和数量有密切关系。

## 4 结论

水泥土加固体是目前中国采用对天然软土地基加固最常用的手段,具有因地制宜、成本低廉、便于操作、绿色环保等优点。但由于环境恶化及腐蚀场地等原因水泥土加固体越来越普遍地发生劣化问题。对水泥土加固体劣化问题研究现状做出总结如下。

(1) 对水泥土加固体进行简单介绍,总结水泥土加固体与原状地基土强度提升的原理及目前对水泥土加固体劣化现象的研究方法。

(2) 归纳分析水泥土加固体劣化机理,总结劣化深度及劣化速率的影响因素,提出应对劣化的时空规律及强度衰减规律进行深层次研究。

(3) 对水泥土加固体在发生劣化问题时渗透性变化研究进行梳理,提出应采用杨俊杰提出的不经养护直接进行渗透的方法进行相关试验更贴近实际工程。

(4) 基于侵蚀环境中水泥土的劣化过程模式,有针对性地对不同服役环境中水泥土加固体的抗劣

化措施进行研究。研究可以从阻断侵蚀性物质的侵入和提高水泥土自身固化性能等方面入手,通过改良固化剂、添加外掺剂等手段加快固化速率、提高固化效率以此增强侵蚀环境中水泥土的抗劣化能力。

## 参 考 文 献

- 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
- 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 Baokuan, Chen Sili, Liu Bin, et al. Experimental study of cemented soil under environmental erosion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 600-603
- 龚晓南. 地基处理手册[M]. 第3版. 北京: 中国建筑工业出版社,2008  
Gong Xiaonan. Ground improvement handbook [M]. 3rd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2008
- 林宗元. 岩土工程治理手册[M]. 第4版. 北京: 中国建筑工业出版社,2005  
Lin Zongyuan. Geotechnical engineering management handbook [M]. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2005
- Kumar A., Gupta D. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(3): 466-474
- 程强强. 粉煤灰水泥加固海相黏土的力学特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京),2018  
Cheng Qiangqiang. Study on mechanical properties of marine clay reinforced with fly ash cement [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2018
- 叶书麟,叶观宝. 地基处理[M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社,2004  
Ye Shulin, Ye Guanbao. Foundation treatment [M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2004
- 叶观宝. 地基加固新技术[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社,2002  
Ye Guanbao. New technology foundation reinforcement [M]. 2nd ed. Beijing: Mechanic Industry Press, 2002
- 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
- Miao J L. Evaluation on long term durability of cement stabilized soils under seawater environment [D]. Fukuoka: Kyushu University, 2013
- 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 Zhangming. The theory of soft soil foundation reinforcement design and construction [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2012  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's



- Republic of China. Technical code for ground treatment of buildings: JGJ 79—2012 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012
- 13 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
- 14 Ayldeen M, Kitazume M. Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45(6): 592-602
- 15 江国龙, 陈四利, 王军祥. 酸碱与钠盐耦合环境对水泥土的侵蚀研究[J]. *中外公路*, 2018, 38(6): 223-227  
Jiang Guolong, Chen Sili, Wang Junxiang. Study on erosion of cement soil by coupling environment of acid-base and sodium salt [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2018, 38(6): 223-227
- 16 Bahmani S H, Farzadnia N, Asadi A, et al. The effect of size and replacement content of nanosilica on strength development of cement treated residual soil [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 118: 294-306
- 17 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 Junjie, 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
- 18 施建勇, 邹坚. 深层搅拌桩复合地基沉降计算理论研究[J]. *岩土力学*, 2002, 23(3): 309-315  
Shi Jianyong, Zou Jian. Study on calculative theory of settlement calculation of composite ground reinforced by deep-mixing pile ground [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(3): 309-315
- 19 Liu Y, Jiang Y J, Xiao H, et al. Determination of representative strength of deep cement-mixed clay from core strength data [J]. *Géotechnique*, 2017, 67(4): 350-364
- 20 Kariyawasam K, Jayasinghe C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 105: 519-527
- 21 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
- 22 Ikegami M, Masuda K, Ichiba T. Physical properties and strength of cement-treated marine clay after 20 years [C]//Proceedings of 55th Annual Meeting of Japan Society of Civil Engineers. Sendai, Japan: Japan Society of Civil Engineer, 2002: 123-124
- 23 董凯赫. 抗渗性水泥土性能的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014  
Dong Kaihe. Experimental study on properties of impervious cement soil [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014
- 24 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 Guojun. New technology for geotechnical engineering management [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009
- 25 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
- 26 王忠啸, 崔新壮, 崔社强, 等. 咸水区水泥土桩劣化及改性对道路复合地基的影响[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2018, 48(4): 69-77  
Wang Zhongxiao, Cui Xinzhuang, Cui Sheqiang, et al. The influence of soil-cement pile deterioration and modification in salt-water area on road composite foundation [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2018, 48(4): 69-77
- 27 马芹永, 高常辉. 冲击荷载下玄武岩纤维水泥土吸能及分形特征[J]. *岩土力学*, 2018, 39(11): 3921-3928, 3968  
Ma Qinyong, Gao Changhui. Energy absorption and fractal characteristics of basalt fiber-reinforced cement-soil under impact loads [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(11): 3921-3928, 3968
- 28 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(Supp. 2): 857-861
- 29 Consoli N C, Foppa D, Festugato L, et al. Key parameters for strength control of artificially cemented soils [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(2): 197-205
- 30 Veloso Marques S F, Consoli N C, Almeida e Sousa J. Testing cement improved residual soil layers [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 26(3): 544-550
- 31 李文斌. 从水泥土强度增长机理分析看增强措施[J]. *甘肃水利水电技术*, 1994, (2): 63-68  
Li Wenbin. Study the enhancement measures by analysis the cement-soil strength [J]. *Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology*, 1994, (2): 63-68
- 32 Bell F G. Cement stabilization and clay soils, with examples [J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 1995, 1(2): 139-151
- 33 Gotoh M. Study on soil properties affecting the strength of cement treated soils [C]//Grouting and Deep Mixing: Proceedings of Ist-Tokyo96, the Second International Conference on Ground Improvement Geosystem. Tokyo: AA Balkema, 1996: 399-404
- 34 崔新壮, 龚晓南, 李术才, 等. 盐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): 66-86  
Cui Xinzhuang, Gong Xiaonan, Li Shucai, et al. Deterioration effect of soil-cement pile under salt water environment and its influence composite foundation settlement of road [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(5): 66-86
- 35 Tsuchida T, Porbaha A, Yamane N. Development of a geomaterial from dredged bay mud [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2001, 13(2): 152-160
- 36 Ghosh A, Samanta M, Sharma S, et al. Estimation of unconfined compressive strength of cement treated soft Indian Coastal Clay [C]//Proceedings of Indian Geotechnical Conference. Kochi: Indian Geotechnical Society, 2011: 15-17
- 37 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[R]. 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 [R]. Report of the Port and Harbour Research Institute, 1999, 38(2): 143-147
- 38 孔晓璇,柳志平,邱晓,等. 水泥土在海水侵蚀下耐久度的初步探讨[J]. 混凝土世界, 2011(11): 72-76  
Kong Xiaoxuan, Liu Zhiping, Qiu Xiao, et al. Preliminary discussion on durability of cement soil under seawater erosion [J]. China Concrete, 2011(11): 72-76
- 39 乔俊义. 污染水泥土抗压强度的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008  
Qiao Junyi. Experimental study on the strength of cemented soil under the polluted conditions [J]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008
- 40 陈四利,杨雨林,张精禹,等. 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, et al. 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
- 41 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  
Yang Junjie, Shang Jinrui, Yan Nan, et al. An experimental method of stabilized soil deterioration under field conditions [J]. Ground Improvement, 2015, 26(4): 16-21
- 42 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, USA: American Society of Civil Engineers, 2003: 586-597
- 43 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 Xiangjun, Yang Guochun. Research on preventing cement erosion in marine soil [J]. Journal of Changchun Institute of Technology, 2000, 1(1): 12-14
- 44 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 Xiaoming. Microstructure and mechanism research on cement stabilized salt-rich clay [D]. Shanghai: Tongji University, 2006
- 45 乔宏霞,何忠茂,朱彦鹏,等.  $\text{SO}_4^{2-}$  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 Hongxia, He Zhongmao, Zhu Yanpeng, 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
- 46 王军,李悦. 矿渣水泥混凝土抗海水侵蚀性能试验研究[J]. 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
- 47 赵永强. 污染对水泥土影响的力学试验及其损伤本构模型研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008  
Zhao Yongqiang. Research on mechanical experiment and damage constitutive model of cement soil effect by pollution [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008
- 48 韩鹏举,白晓红,赵永强,等.  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  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 Pengju, Bai Xiaohong, Zhao Yongqiang, et al. Experimental study on strength of cement soil under  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  interaction influence [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 72-76
- 49 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
- 50 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 Engineer Journal, 2017, 50(11): 115-124
- 51 张树彬,王清,陈慧娥,等. 土体腐殖质对水泥土固化的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(2): 218-220  
Zhang Shubin, Wang Qing, Chen Hui'e, et al. The influences of reinforcing cement soil on soil humus [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) 2005, 35(2): 218-220
- 52 艾志伟,邓通发. 水泥土强度的影响因素研究进展[J]. 公路, 2014, 59(1): 195-199  
Ai Zhiwei, Deng Tongfa. Advances in research on factors affecting cement soil strength [J]. Highway, 2014, 59(1): 195-199
- 53 范昭平,朱伟,张春雷. 有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1327-1330  
Fan Zhaoping, Zhu Wei, Zhang Chunlei. Experimental study on influence of organic matter content on solidified dredging [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1327-1330
- 54 张树彬,王清,陈剑平,等. 土体腐殖酸组分对水泥土强度影响效果试验[J]. 工程地质学报, 2009, 17(6): 842-846  
Zhang Shubin, Wang Qing, Chen Jianping, et al. Tests for effect of soil humic acid component on strength of cement soils [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(6): 842-846
- 55 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 Quansheng, Qu Jiawang, Liu Zhiping, et al. Experimental study of mechanical properties of cemented soil under corrosion influence [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3377-3384
- 56 Fischer K P, Andersen K H, Mowm J. Properties of an artificially cemented clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 322-331
- 57 Lee F H, Lee Y, Chew S H, et al. Strength and modulus of marine clay-cement mixes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(2): 178-186
- 58 李灿,周海清,赵尚毅,等. 低掺量水泥土早期强度特性试验研究[J]. 当代化工, 2019, 48(1): 13-16  
Li Can, Zhou Haiqing, Zhao Shangyi, et al. Experimental study on early strength characteristics of low-content cement soil [J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(1): 13-16
- 59 闫楠,杨俊杰. 海相软土地场地形成的水泥土劣化深度预测[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(11): 92-99  
Yan Nan, Yang Junjie. Prediction of deterioration depth of soil cement stabilized in marine soft clay site [J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Sciences), 2015, 45(11): 92-99
- 60 王达爽,杨俊杰,董猛荣,等. 水泥土强度预测室内试验研



- 究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(7): 96-102  
Wang Dashuang, Yang Junjie, Dong Mengrong, et al. Laboratory test on the prediction of cement soil strength [J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Sciences), 2018, 48(7): 96-102
- 61 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 Chengfu, Liu Songyu, Deng Yongfeng, 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
- 62 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  
Yang Junjie, Zhang Yuechen, Yan Nan, et al. Laboratory simulation experiment on deterioration of cement stabilized soil in site [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2012, 29(3): 1-5
- 63 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
- 64 寺师昌明, 田中洋行, 光本司, 等. 石灰·セメント系安定処理土の基本的特性に関する研究[R]. 第3報. 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 [R]. 3rd report. Report of the Port and Harbour Research Institute, 1983, 22(1): 69-96
- 65 叶书麟, 韩杰, 叶观宝. 地基处理与托换技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994  
Ye Shulin, Han Jie, Ye Guanbao. Foundation treatment [M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2004
- 66 侯永峰, 龚晓南. 水泥土的渗透特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2000, 34(2): 189-193  
Hou Yongfeng, Gong Xiaonan. The permeability of cement-treated soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2000, 34(2): 189-193
- 67 董邑宁. 水泥土强度及渗透特性试验研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2000, 18(6): 13-16  
Dong Yining. Experimental research of strength and permeability of cement-treated soil [J]. Journal of Qinghai University (Engineering Science), 2000, 18(6): 13-16
- 68 徐超, 黄亮, 妍皓枫. 水泥-膨润土泥浆配比对防渗墙渗透性能的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 422-426  
Xu Chao, Huang Liang, Yan Gaofeng. Influence of cement-bentonite slurry mixing ratio on permeability of cutoff wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 422-426
- 69 杨俊杰, 袁伟, 许绍帅, 等. 水泥土渗透性的室内试验研究[J]. 广东公路交通, 2012, (2): 13-16  
Yang Junjie, Yuan Wei, Xu Shaoshuai, et al. Experimental study on permeability of cement-treated Soil [J]. Guangdong Highway Communications, 2012, (2): 13-16
- 70 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
- 71 Lorenzo G A, Bergado D T. Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(2): 161-174

## Research Progress on Cement Stabilized Soil Degradation Characteristics

YAN Nan<sup>1</sup>, ZHENG Chen<sup>2</sup>

(College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University<sup>1</sup>, Qingdao 266071, China;

College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology<sup>2</sup>, Qingdao 266033, China)

**[Abstract]** Cement stabilized soil have become the most common method for improving soft soil foundation in China due to its excellent compressive strength, low cost of local materials and simple construction methods. However, the problem of deterioration of cement stabilized soil has attracted attention due to environmental pollution or the corrosive nature of the subterranean soil itself. The research on the strength growth mechanism, deterioration mechanism, factors affecting the depth of deterioration and permeability change of cement soil were summarized. In addition, the insufficiency of the research on cement soil solidification degradation were discussed, and the future of cement soil solidification was put forward.

**[Key words]** cement stabilized soil soft soil foundation deterioration strength decay permeability