

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.04.054

# 海泡石固化盐渍土的耐久性试验研究

朱燕<sup>1,2</sup>, 余湘娟<sup>1</sup>, 高磊<sup>1</sup>

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 南通职业大学 建筑工程学院)

**摘要:**利用海泡石对盐渍土进行固化改良,对固化盐渍土进行了强度试验、水稳性试验和干湿循环试验,并通过X衍射试验和SEM试验对固化盐渍土的机理进行了初步探讨。试验结果表明:海泡石固化盐渍土的强度、水稳性和抗干湿循环性均得以提高,符合耐久性要求。固化后的盐渍土矿物结构未发生改变,但由于海泡石填充、包裹和缠绕作用,土体更加密实。

**关键词:**盐渍土;海泡石;耐久性;固化机理

江苏沿海盐渍土的面积有1 000多万亩(1亩=666.66 m<sup>2</sup>),自南(南通)向北(连云港)沿黄海呈带状分布,其中海堤以外滩涂有500多万亩。江苏沿海地区地下50 m内的盐渍土类型均为氯盐渍土,且易溶盐分含量、腐蚀性特征均呈现了浅部含量逐渐升高—中层含量出现高值—深层含量逐渐降低的分布趋势。氯盐侵蚀导致盐渍土地区发生盐胀、波浪、鼓包、开裂等不良路基路面病害,影响了江苏沿海地区道路工程建设和滩涂开发,制约了当地经济的发展。

盐渍土为细颗粒的特殊土,易使路基路面产生溶陷、膨胀和腐蚀等病害,充分利用盐渍土作为路基填料成为沿海地区道路工程建设中的重要问题之一,而其

耐久性问题应为重点内容进行研究。影响固化土耐久性的主要因素有收缩开裂、水稳性和抗冻性等。该文采用人工配置盐渍土,通过室内模拟试验,对固化盐渍土的强度、水稳性和干湿循环性进行研究,并利用X-ray试验和SEM试验对固化盐渍土的机理进行初步探讨。

## 1 试验概况

### 1.1 试验用土

试验用土取自南通市如东县,取土深度为地下2 m,其物理指标列于表1,属于非盐渍土。

表1 土层基本物理指标

相对 密度	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	最大 干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含 水率/ %	颗粒组成/%		
						2~ 0.075 mm	0.075~ 0.005 mm	<0.005 mm
2.63	22.3	10.4	11.9	1.57	18.2	3.56	73.71	22.73

### 1.2 固化材料

试验选用海泡石固化盐渍土,海泡石为市售普通海泡石,化学式为Mg<sub>8</sub>Si<sub>12</sub>O<sub>30</sub>(OH)<sub>4</sub>(OH<sub>2</sub>)<sub>4</sub>·8H<sub>2</sub>O,是一种层链状的硅酸盐矿物,外观为灰白色絮状物,密度为1.2~1.5 t/m<sup>3</sup>,硬度为2~2.5,熔点为1 650℃,黏度为30~40 s。具有较好的抗盐性、吸附性、流变性、离子交换性和催化特性等。海泡石的主要化学成分见表2。

表2 海泡石的主要化学组成

SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
64.12	18.29	1.02	1.98	3.26

### 1.3 试样制备

试验主要采用人工配制氯盐渍土。将土样过2 mm标准筛,按照一定含水率配制好后在室温下密封静置24 h,根据氯盐渍土含盐量3%称取所需NaCl,

将其倒入土中搅拌均匀,室温下密封存放 7 d,使得土样中的盐分能够分布均匀并与土体充分交换吸附,其后加入漫过土体的足量蒸馏水放置 48 h,使土样和盐分继续交换吸附,之后将土样置于自然状态下风干,碾碎过筛(2 mm)后得到人工配制的中盐渍土。

依据表 1 中最优含水率和最大干密度,将海泡石按照固化材料掺量(固化材料质量/干土质量)分别为 0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 和 1.5% 的配比加入人工配置的盐渍土中。根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,采用静压法制备尺寸为直径 39.1 mm、高度 80 mm 的试样,每组 3 个平行试样。将制备好的试样放入标准养护箱(温度 25 ℃,湿度 95%)中养护到规定龄期。试验仪器为 YYW-2 型应变控制式无侧限抗压强度仪,抗压强度仪升降板的速率为 2.4 mm/min。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 无侧限抗压强度试验

将上述试样标准养护 0、7、14、21 和 28 d,测试不同固化盐渍土样的无侧限抗压强度,结果见图 1。

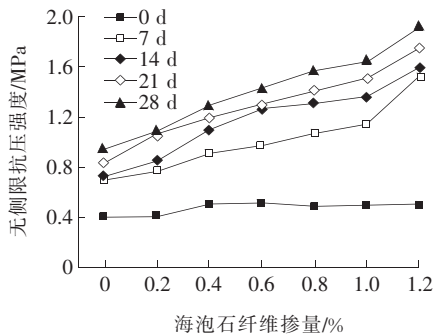


图 1 固化材料掺量对强度的影响

从图 1 可以看出:固化盐渍土的无侧限抗压强度随着海泡石掺量的增加而显著增加。当海泡石掺量为 1.0% 以内时,固化盐渍土的无侧限抗压强度增长速度较为平稳,而当海泡石掺量为 1.2% 时,增长的速度突增。龄期为 7、14、21 和 28 d 时,1.2% 海泡石固化盐渍土的无侧限抗压强度分别达到了 1.53、1.59、1.75 和 1.92 MPa,比素盐渍土的无侧限抗压强度分别增加了 118%、121%、111% 和 104%。这说明海泡石的加入可有效提高盐渍土的无侧限抗压强度,且掺量为 1.2% 海泡石固化盐渍土效果明显。

当海泡石掺量较低时,固化盐渍土具有明显的塑性特征,随着海泡石掺量的增加,抗压强度增大,弹塑

性特征明显,并逐渐显示出脆性破坏的特征。

不同掺量的海泡石固化盐渍土不同养护龄期的抗压强度增幅如图 2 所示。

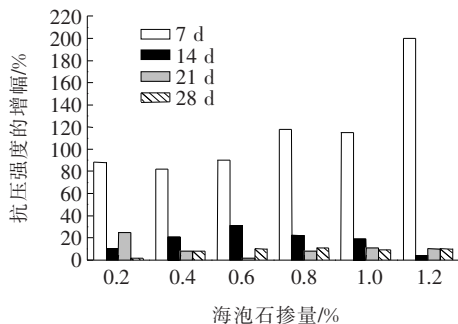


图 2 不同海泡石掺量时养护龄期的抗压强度增幅

从图 2 可以看出:所有固化盐渍土的抗压强度随着养护龄期的增长都在不断地增加,且强度增长时间主要集中在 7 d 龄期内。在海泡石掺量为 1.2%,养护龄期为 7 d 时,其抗压强度增幅高达 200%。以海泡石掺量 1.0% 为例,在养护龄期分别为 7、14、21 和 28 d 时,其无侧限抗压强度增幅分别为 128.00%、19.30%、11.03% 和 8.61%,说明随着龄期的增长,海泡石固化盐渍土的强度会持续提高,开始时较为明显,后慢慢趋于稳定,道路基层施工时尤其要注意前期养护。

### 2.2 水稳性试验

制备水稳性试验试样,方法与前述无侧限抗压强度试验相同。一组试样标准养护 7 d 和 28 d 后测定其无侧限抗压强度( $q_{u0}$ ),另一组试样在达到规定龄期前,先在水中浸泡 24 h,然后测定其强度( $q_{ui}$ )。 $q_{ui}$  与  $q_{u0}$  的比值定义为水稳系数  $K$ :

$$K = \frac{q_{ui}}{q_{u0}} \times 100\% \quad (1)$$

在浸泡过程中,素盐渍土在 12 h 内完全崩塌,无法测得其无侧限抗压强度,水稳性极差。0.2%~0.6% 海泡石掺量的试样表面均有不同程度的脱皮现象,0.8%~1.2% 试样在泡水 1 d 后基本能保持其完整性。

不同海泡石掺量在 7 d 和 28 d 的水稳系数  $K$  见图 3。由图 3 可知:海泡石固化盐渍土的水稳性系数明显高于素盐渍土。随着海泡石掺量的增加,试样的水稳系数也在增加。在 7 d 龄期时,0.2%~1.2% 试样的  $K$  值均在 50% 左右,而素盐渍土的  $K$  值则为 0。此外,试样的水稳系数也随固化时间的增加而增加。固化盐渍土水稳系数  $K$  在龄期 7 d 到 28 d 之间分别增加 16.22%、20.95%、21.71%、19.17% 和 19.17%,

28 d后保持约60%。与素盐渍土相比,掺入海泡石可显著提高盐渍土的水稳性,且1.2%海泡石固化盐渍土的 $K_{7d}$ 和 $K_{28d}$ 均最高。

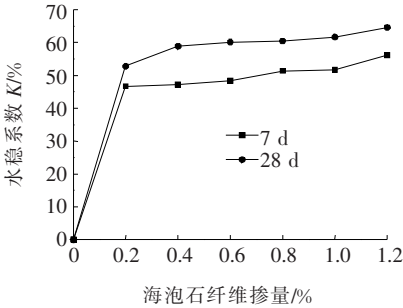


图3 掺量及龄期对固化盐渍土水稳系数的影响

2.3 干湿循环试验

制备干湿循环试验试样,方法与前述无侧限抗压强度试验相同。试样在水中浸泡12 h,然后在室温下自然干燥12 h即为1次干湿循环。测试不同龄期、不同掺量的海泡石固化盐渍土的干湿循环次数。

试验发现:① 7 d龄期下,素盐渍土在经历1次干湿循环后基本崩解,无法测其无侧限抗压强度、质量和直径,0.2%~0.6%掺量海泡石固化盐渍土的表面侵蚀严重,0.8%~1.0%掺量海泡石固化盐渍土的表面斑驳,出现裂纹,1.2%掺量海泡石固化盐渍土的形态基本完整;② 不同掺量和龄期下,固化盐渍土可经历的干湿循环次数不同。7 d龄期下,0.2%~0.6%掺量海泡石固化盐渍土的干湿循环次数为1次,0.8%~1.0%掺量海泡石固化盐渍土为2次,1.2%掺量海泡石固化盐渍土为3次。

为定性评价固化盐渍土的干湿循环性,以质量损失率 $L$ 来表示:

$$L = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{M_{i,w}}{M_w} - \frac{M_{i,0}}{M_0} \right) \tag{2}$$

式中: $M_{i,w}$ 为第*i*次干湿循环后干试样的干质量损失(g); $M_{i,0}$ 为第*i*次干湿循环后控制样的干质量损失(g); $M_w$ 为干试样的初始干质量(g); $M_0$ 为控制样的初始干质量(g)。

固化盐渍土在干湿循环中质量损失率及干湿循环次数的变化情况如图4所示。

从图4(a)中可以看出:7 d龄期时,0.2%~0.6%海泡石固化盐渍土在经历1次干湿循环后,其质量损失率均高于30%,判定耐久性不符合要求;0.8%~1.0%海泡石固化盐渍土在经历2次干湿循环后,耐久性符合要求;1.2%海泡石固化盐渍土在经历3次干湿循环后,耐久性也符合要求。从图4(b)中可以看出:

28 d龄期时,0.2%~1.2%海泡石固化盐渍土在试样断裂前,其质量损失均低于30%,满足耐久性的要求。且1.0%~1.2%海泡石固化盐渍土的干湿循环次数有所提高,1.0%海泡石固化盐渍土的循环次数为3次,而1.2%海泡石固化盐渍土的循环次数则为4次。由此可见:海泡石固化盐渍土的抗干湿循环性随着掺量及龄期的增加而提高。工程实践中,若前期养护时间充足、条件良好,0.8%~1.2%海泡石固化盐渍土的效果较为良好,满足耐久性的需求。

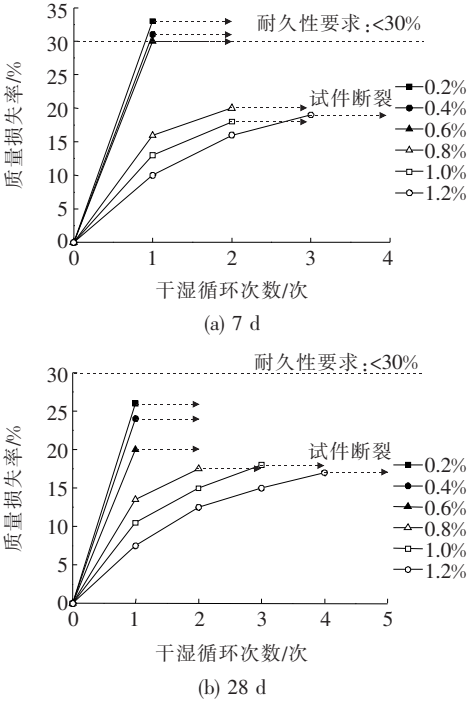


图4 不同龄期及海泡石掺量下固化盐渍土的质量损失率

3 固化机理试验研究

3.1 X射线衍射试验

制备无侧限抗压强度圆柱试件,标准养护7 d。对素盐渍土及海泡石固化后的盐渍土进行X衍射试验。试验结果如图5所示。

由图5(a)、(b)可知:1.2%海泡石固化盐渍土的X射线衍射图与素盐渍土的X射线衍射图基本吻合,没有出现新峰,说明海泡石没有与盐渍土发生化学反应,产生新的官能团和矿物成分,且海泡石掺量较少,对盐渍土矿物结构影响较小。

3.2 扫描电镜试验

制备无侧限抗压强度圆柱试件,标准养护7 d。对素盐渍土及海泡石固化后的盐渍土进行微观电镜扫

描,获得 SEM 照片,放大倍数为 3 000。试验结果如图 6 所示。

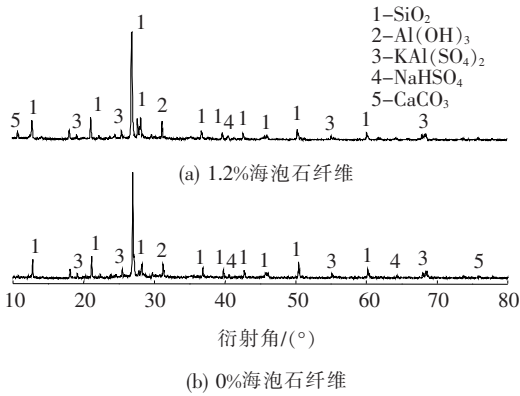


图 5 X 射线衍射图

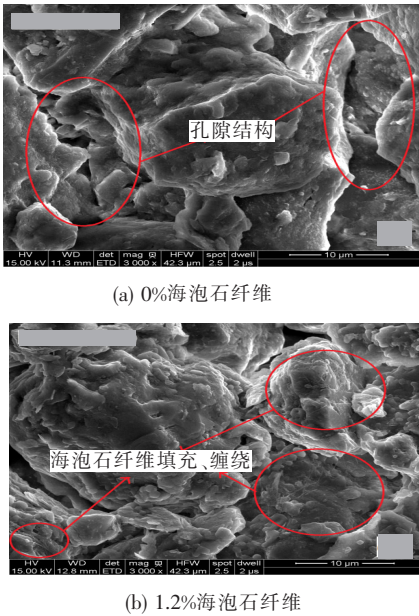


图 6 扫描电镜图

由图 6 可知:素盐渍土呈现分散的、不连续的孔隙结构,孔洞数量多、体积大。而经海泡石改良后的盐渍土,孔隙中充填细小纤维物质,使得土体中主要矿物成分平均晶粒尺寸均有不同程度的减小,降低了土体的空隙率,孔隙结构更为密实,且海泡石缠绕、包裹土体颗粒,起到增强加筋的作用,提高了土样的强度。

### 3.3 固化机理分析

海泡石具有微孔结构,经活化处理后,质地疏松,孔隙度大,比表面积较大,吸水性较强,加入到土体会吸收土中的水分,通过水解反应、质子化反应和静电引力作用,使土体吸附层减薄,电位降低,致使盐渍土颗粒发生聚结。这些作用的结果导致土体分散性和黏塑性降低,土颗粒的结构强度和稳定性得以提高。随

着海泡石掺量的增加和龄期的增长,发生反应的程度也就越大,土颗粒的强度就越高,水稳性及抗干湿循环性也越强。

此外,微小的海泡石分支较多,纤维相互缠绕,且表面粗糙不平,粗细不均,纤维端部有明显的突起,似“触角”状,有利于相互搭接,在土体当中以三维网络结构均匀分布,包裹、连接颗粒,有效地填充土体中的微小孔隙,使土体结构变得致密,从而促使土体干密度增大,提高土体强度。海泡石混合在土颗粒之间的孔隙当中,当土体受到外部荷载作用发生变形时,弯曲缠绕在土颗粒间的海泡石也发生拉伸变形,同时提供拉力。由海泡石提供的拉力可以部分抵消外荷载,起到“加筋”的作用,从而提高土体强度。且这种“加筋”效果主要取决于海泡石和土颗粒之间的摩擦力,施工时可适当提高压实度来保证海泡石和土颗粒之间结合的紧密程度及接触面的粗糙程度,确保施工质量。

## 4 结论

(1) 海泡石可以在较大程度上提高盐渍土的强度,作为盐渍土公路路基的新型固化材料,海泡石具有较大的使用价值和应用前景。

(2) 综合考虑固化改良效果及耐久性要求,建议对含盐量为 3% 的滨海氯盐渍土中掺入 1.2% 海泡石,其强度、水稳性及抗干湿循环性均达到最佳效果。若加强前期养护,0.8%~1.2% 海泡石固化盐渍土的效果较为良好,能获得较高强度,满足耐久性的需求。

(3) 根据 X 衍射试验和 SEM 试验结果显示,海泡石没有与盐渍土发生化学反应,产生新的官能团和矿物成分;海泡石通过吸附、“触角”和“加筋”作用,缠绕填充在土体孔隙中,吸收土中水分,使盐渍土颗粒结合形成稳定整体,从而提高盐渍土的抗压强度及耐久性。

### 参考文献:

- [1] 周琦,韩文峰,邓安,等.滨海盐渍土作公路路基填料试验研究[J].岩土工程学报,2006(9).
- [2] 文桃,曹亚鹏,应赛,等.多次冻融循环下硫酸盐渍土盐-冻胀特性试验研究[J].中外公路,2018(2).
- [3] 方秋阳,柴寿喜,李敏,等.冻融循环对固化盐渍土的抗压强度与变形的影响[J].岩石力学与工程学报,2016(5).
- [4] 张涛.基于工业副产品木质素的粉土固化改良技术与工程应用研究[D].东南大学博士学位论文,2015.
- [5] 冯巧,刘瑾,卢毅,等.一种复合加固土体及改良砂土的强度试验研究[J].工程地质学报,2017(4).