

DOI: 10. 20174/j. JUSE. 2026. 02. 18

# 滨海高含水率吹填土轻质固化技术及微观机理

杨爱武<sup>1</sup>, 刘昊轩<sup>1</sup>, 韩英杰<sup>2</sup>

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620, 2. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

**摘要:** 高含水率吹填土具有强度低、含水率高、结构不稳定等不良工程特性, 采用自行研究的新型固化剂对天津滨海地区吹填土进行固化处理, 以期达到轻质高强的性能。为探究吹填固化土强度影响因素, 对吹填固化土进行无侧限抗压试验、三轴剪切试验和微观结构测试。结果表明: 吹填固化轻质土的无侧限抗压强度与其密度成正相关; 碱性环境和含盐量在 pH 值小于 11.4、含盐量低于 1% 时有利于吹填固化轻质土强度的提高, 超过此界限会分别抑制固化土的强度增长; 当含盐量和 pH 值较低时, 土体出现应变软化现象, 随着含盐量、pH 值增大, 吹填固化轻质土的黏聚力和内摩擦角逐渐增大; 通过氮气吸附试验、SEM 扫描电镜试验从微观层面上解释了吹填固化轻质土强度随密度、含盐量、pH 的变化机理。研究成果可为工程实际提供理论依据和借鉴参考。

**关键词:** 高含水率吹填土; 轻质固化技术; 无侧限抗压强度; 剪切强度; 微观机理

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2026)02-0565-11

## Research on Lightweight Curing Technology of Coastal High Moisture Content Blowfill and Its Micro-Mechanisms

Yang Aiwu<sup>1</sup>, Liu Haoxuan<sup>1</sup>, Han Yingjie<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, P. R. China; 2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, P. R. China)

**Abstract:** Blow-filled soil with high water content has poor engineering characteristics such as low strength, high water content and structural instability, etc. A new type of curing agent researched in-house was used to cure the blow-filled soil in the Binhai area of Tianjin, to achieve the properties of lightweight and high strength. In order to investigate the factors affecting the strength of blow-fill cured soil, the blow-fill cured soil was subjected to unconfined compression test, triaxial shear test and microstructure test. The results show that: The unconfined compressive strength of blow-fill cured lightweight soil is positively correlated with its density; The alkaline environment and salt content are favourable to the strength of blow-fill cured lightweight soil when the pH value is less than 11.4 and the salt content is lower than 1%, and the strength growth of cured soil is inhibited when the salt content is higher than this limit, respectively. When the salt content and pH value are low, the soil shows strain softening phenomenon, and the cohesion and internal friction angle of blow-fill cured lightweight soil gradually increase with the increase of salt content and pH value. The change mechanism of the strength of blow-fill cured lightweight soil with density, salt content and pH is explained from the microscopic level by nitrogen adsorption test and SEM scanning electron microscope test. The research results can provide a theoretical basis and reference for engineering practice.

**Keywords:** high moisture content blown fill; lightweight curing technology; unconfined compressive strength; shear strength; micro-mechanisms

收稿日期: 2025-05-09(修改稿)

作者简介: 杨爱武(1971—), 男, 安徽桐城人, 博士, 教授、博士生导师, 从事软黏土力学特性及土体微观结构研究。

E-mail: tulilab@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(42377141, 42177119, 51978440); 中央高校基本科研业务专项资金(2232021A-07)

## 0 引言

近海疏浚土吹填造陆是开发土地的有效方法,然而吹填土含水率高、强度极低,无法直接工程应用。通过固化轻质技术改善滨海高含水率吹填土力学性能,进一步研究相应的力学演化机理有利于合理高效利用高含水率吹填土进行工程建设。

近几年,国内外许多专家研究轻质土固化技术,他们根据土质的异同,使用了不同的固化方法,获得了较好的工程应用。

龙开荃等<sup>[1]</sup>通过复合型早强固化剂对淤泥土进行固化,指出固化淤泥土强度随养护龄期对指数规律提高。李丽华等<sup>[2]</sup>采用稻壳灰和高炉矿渣作为固化剂对膨胀土进行固化,研究发现随固化剂掺量增多,固化土黏聚力先增大后减小,内摩擦角逐渐增大。李文涛等<sup>[3]</sup>发现针对硫酸盐土,使用氧化镁少量代替水泥可以提升固化土强度和水稳定性。丰土根等<sup>[4]</sup>通过二氧化碳制备泡沫水泥浆对淤泥土进行固化处理,结果表明随着泡沫浆液的增多,固化土抗压强度、内摩擦角及黏聚力均呈上升趋势。

金胜赫等<sup>[5]</sup>发现固化黏土强度随固化剂掺量和养护龄期增加而增大。杜延军等<sup>[6]</sup>在固化锌污染高岭土的研究中发现,固化土的抗压强度和变形模量会随锌离子浓度增加而呈下降趋势。杨爱武等<sup>[7]</sup>、Jo 等<sup>[8]</sup>、林彤等<sup>[9]</sup>发现添加多种固化材料的效果要优于单一材料添加效果,且随养护龄期的增加,其提升幅度逐渐增大。Lee 等<sup>[10]</sup>和 Consoli 等<sup>[11]</sup>研究原料土体含水率对固化土强度的影响。关于吹填土的固化处理,雷华阳等<sup>[12]</sup>使用改性石灰对吹填土进行固化处理,通过掺入聚丙烯酰胺提高石灰加固吹填土的抗变形能力。杨少朋等<sup>[13]</sup>发现吹填固化土抗剪强度会随初始偏应力增加而降低。

针对微观机理的研究,杨浩等<sup>[14]</sup>通过对电镜扫描试验,分形维数来研究淤泥固化的微观机理。朱剑锋等<sup>[15]</sup>通过 X 射线衍射试验分析固化土矿物

成分,揭示了固化软土力学特性受多因素影响下的微观机理。许多学者将固化土微观结构与宏观力学特性相结合,研究固化技术的微观机理。李建东等<sup>[16]</sup>研究加固黄土的力学特性和围压孔隙结构,发现土颗粒聚集和凝结会影响土体密实度和承载力。吕擎峰等<sup>[17]</sup>通过核磁共振技术对比微观特征,将固化土颗粒间的胶结情况和无侧限抗压强度试验结合讨论了固化土强度成因的微观机制。王东星等<sup>[18-19]</sup>研究得到微观结构更紧密的固化淤泥宏观表现为具有更好的力学特性。且骨架起到支撑和填充作用,使得固化淤泥具有更好的强度。吴燕开等<sup>[20]</sup>通过扫描电镜得到不同侵蚀龄期土体的微观颗粒结构形态,分析了固化土微观结构变化与宏观强度变化的相互关联特性。吴雪婷等<sup>[21]</sup>、王东星等<sup>[22]</sup>使用不同种固化剂对淤泥进行固化土并分析宏观特性,揭示了固化淤泥的微观特征演变过程。杨爱武等<sup>[23]</sup>针对天津滨海固化软土进行微观结构分析,发现固化土中凝胶、晶体等可以填充孔隙,有利于固化土强度的提高。张亭亭等<sup>[24]</sup>分析铅污染固化土内土颗粒团聚化、胶结程度及孔隙体积的变化,揭示了土体强度和渗透特性变化的微观机理。

通过以上研究,可以看到现有关于固化土、微观机理的研究多集中于淤泥土、污染土等,但对于吹填固化轻质土这一具有重要工程价值的改良土体,固化技术研究相对较少且机理研究不透彻。本文通过结合宏观力学试验、微观试验,研究揭示高含水率吹填土的固化强度影响因素,在此基础上建立强度预测公式,以期对固化土高效安全使用提高理论支撑。

## 1 试验材料与方案

### 1.1 试验材料

试验采用天津滨海新区的吹填软土作为配制吹填固化轻质土的原料土,其基本物理性质如表 1 所示。

表 1 天津市滨海吹填土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of Tianjin Binhai blowfill soil

含水量 $\omega/\%$	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	比重 $G_s$	孔隙比 $e$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$
45.1	1.73	2.69	1.265	43	25	18	1.21

所用固化剂为自主研发的固化剂,具有较好的使用成效,所用的发泡剂是采取复合技术研制,其具有发泡快且匀称的特点<sup>[19]</sup>。通过正交试验,

综合考虑土体强度和实际工程造价等因素,最终确定污泥固化土试样的配比如表 2。

表 2 吹填固化轻质土配比

含水率	固化主剂	固化辅剂	发泡剂
80	9	4	0.08

1.2 试验方案

采用上文所筛选出的最佳配比制备好吹填固化轻质土,吹填固化土的强度增长受多种因素影响,如密度、pH 值、含盐量等。本文选取自然发泡后体积与模具(直径 39.1 mm、高度 80 mm)相等的吹填固化轻质土为基本密度为  $1.0\rho_0$  ( $1.31 \text{ g/cm}^3$ ),通过控制放入模具内高度,制备 4 种密度( $\rho_0, 1.1\rho_0, 1.2\rho_0, 1.3\rho_0$ )、5 种 pH 值(5.8, 7.3, 9.6, 11.4, 12.1)、6 种含盐量(0%, 0.3%, 1%, 2%, 3%, 5%),同一组别设置 3 组试验试样进行对照,结果取 3 组试验平均值。分别养护 7 d、14 d、28 d、60 d,进行无侧限抗压强度试验。具体试验方案如表 3 所示。

表 3 吹填固化轻质土试验方案

密度	pH 值	含盐量/%
$\rho_0, 1.1\rho_0,$	5.8, 7.3, 9.6,	0, 0.3, 1,
$1.2\rho_0, 1.3\rho_0$	11.4, 12.1	2, 3, 5

根据吹填固化轻质土的特点和工程实践,采用 4 种围压。考虑滨海吹填土不同含盐量和酸碱性的影响,设置 6 种含盐量、5 种 pH 值进行不排水不固结三轴剪切试验(试样大小、数量同无侧限抗压强度试验),具体试验方案见表 4。

表 4 不同含盐量、pH 值吹填固化轻质土试验方案

含盐量/%	pH 值	围压/kPa
0, 0.3, 1, 2, 3, 5	5.8, 7.3, 9.6, 11.4, 12.1	25, 50, 75, 100

2 试验结果与分析

2.1 吹填固化轻质土无侧限抗压强度特性

由图 1 可知,同一龄期条件下,吹填固化轻质土密度越大,其无侧限抗压强度也越大,这是因为单位体积内的土颗粒随着密度的增大而增加,压缩了其间距,使之联结更加紧密,其抵抗破坏的能力随之增大。由图 1(b)可得养护龄期 7 d、14 d、28 d、60 d 时,吹填固化轻质土的无侧限抗压强度

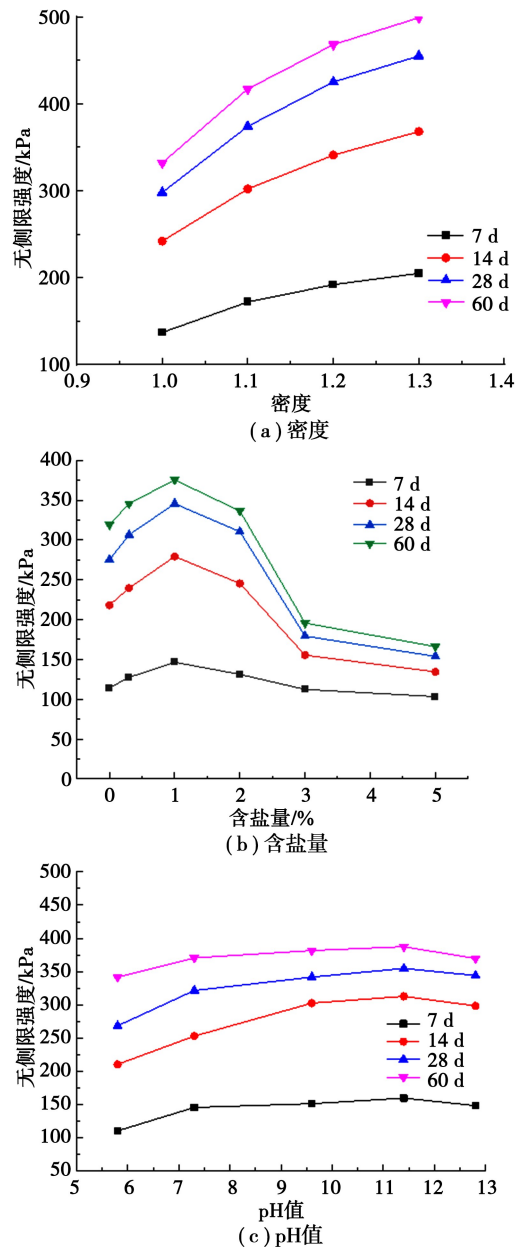


图 1 多影响因素下无侧限抗压强度变化曲线  
Fig. 1 Variation curves of unconfined compressive strength under multiple influencing factors

与含盐量的关系曲线变化规律基本一致。吹填固化轻质土的无侧限抗压强度随着含盐量的增加呈先增大而后减小的趋势,含盐量较低时,随着龄期的增长,无侧限抗压强度增长幅度较大,当含盐量较高时,随着龄期的增长,无侧限抗压强度增长幅度较小。且吹填固化轻质土的无侧限抗压强度随 pH 值的减小而减小,即酸性环境对吹填固化轻质土有一定的抑制作用;当 pH 值在 7.3~11.4 之间时,吹填固化轻质土的无侧限抗压强度在缓慢的增长,当 pH 值大于 11.4 时,其无侧限抗压强度在逐渐降低,这说明吹填固化轻质土在碱性环境中,其无侧限抗压强度有所提高,但 pH 值宜不超过

11.4。这是因为在碱性环境下,土样内更多的  $\text{OH}^-$  会帮助固化土的水化反应,促进了其无侧限抗压强度的提升,而在强碱环境下,过量  $\text{OH}^-$  则会使水化反应逆向进行,降低吹填固化轻质土强度。

## 2.2 吹填固化轻质土抗剪强度指标特性分析

### 2.2.1 不同含盐量影响

图 2 为围压等于 25 kPa、50 kPa、75 kPa、

100 kPa 时不同含盐量  $K$  的情况下固化轻质吹填土应力状态下的应力应变曲线。

由图 2 中可以看出:含盐量 1% 的吹填固化轻质土的抗剪强度最大、含盐量 2%、0.3% 和 0% 抗剪强度次之,其抗剪强度都明显大于含盐量 3% 和 5%。一开始吹填固化轻质土的抗剪强度随含盐量的增加而提升。

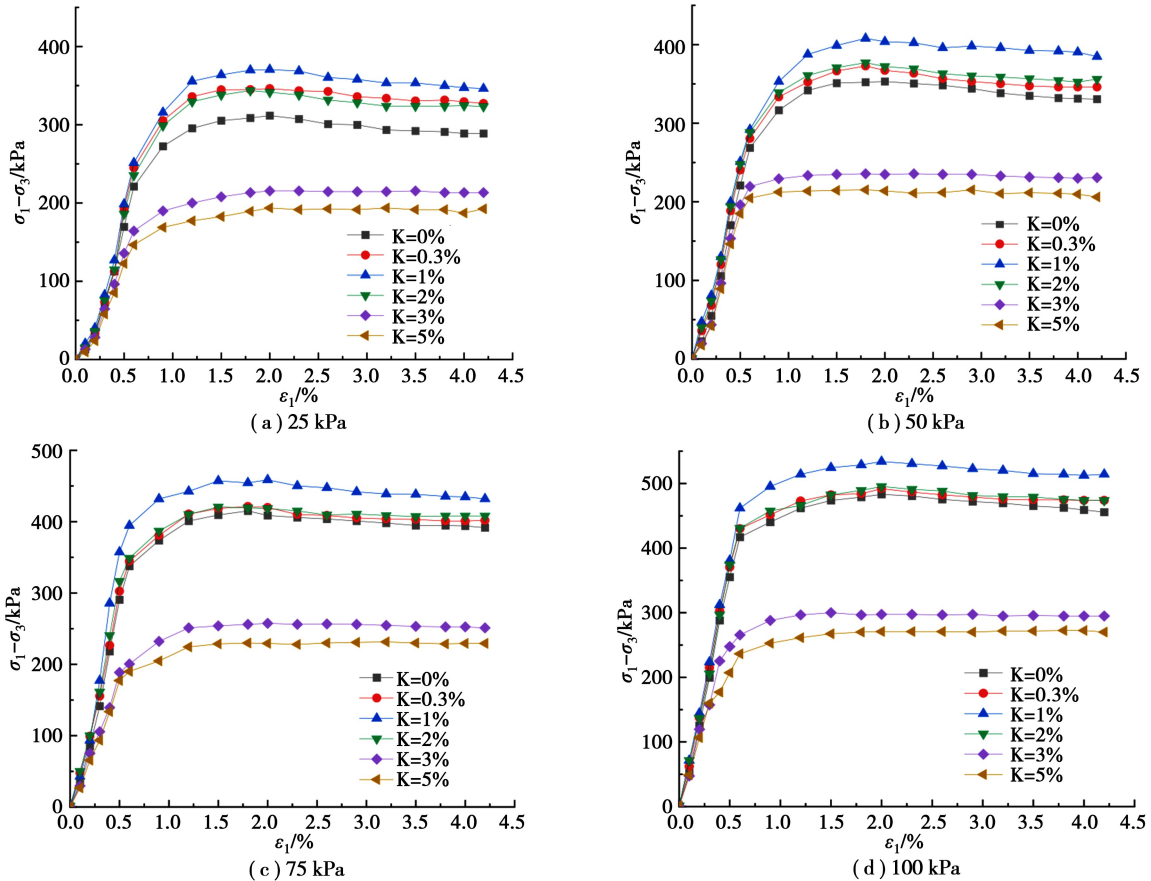


图 2 不同围压下  $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \varepsilon_1$  随含盐量变化曲线

Fig. 2 Variation curves of  $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \varepsilon_1$  with salt content under different enclosing pressures

当含盐量较低 (<3%) 时,土体出现应变软化现象,即在达到破坏应力峰值后,应力随应变的提高而减少,最终趋于稳定;当含盐量 (>3%) 软化现象逐渐消失,土体呈应变硬化。这说明吹填固化轻质土本身存在一定结构性,当含盐量达到一定比例后其结构性逐渐被减弱直到完全破坏。

根据 4 种围压下的摩尔圆包络线分析计算得出  $c, \varphi$  值,如图 3 所示。

根据图 3 可得,黏聚力随含盐量增加先增大后减小,含盐量 1% 时达到最大值。内摩擦角随着含盐量增加呈持续下降趋势,在含盐量超过 2% 时下降趋势增大。当吹填固化轻质土含盐量较低时,盐被孔隙水溶解,孔隙水以盐液离子状态存在,黏聚力较小,随含盐量增大,吹填固化轻质土中孔隙

水的盐溶液达到饱和,少量盐分可以起到一部分骨架作用,产生一定的胶结作用,从而黏聚力增大,当含盐量过大时,盐分以晶体形式析出,使得固体土颗粒之间的咬合接触减小导致黏聚力减小,且固体颗粒结构遭到盐晶体的破坏,内摩擦角逐渐减小。

### 2.2.2 不同 pH 值影响

图 4 分别为围压等于 25 kPa、50 kPa、75 kPa、100 kPa 时不同 pH 值的情况下固化轻质吹填土应力状态下的应力应变曲线。

由图 4 可以看出:吹填固化轻质土的斜率与围压呈正相关,当围压较小时,其应变破坏值大约为 2%;当围压较大时,其应变破坏值为大约为 1.5%。当  $\text{pH}=11.4$  时的吹填固化轻质土的抗剪强度最

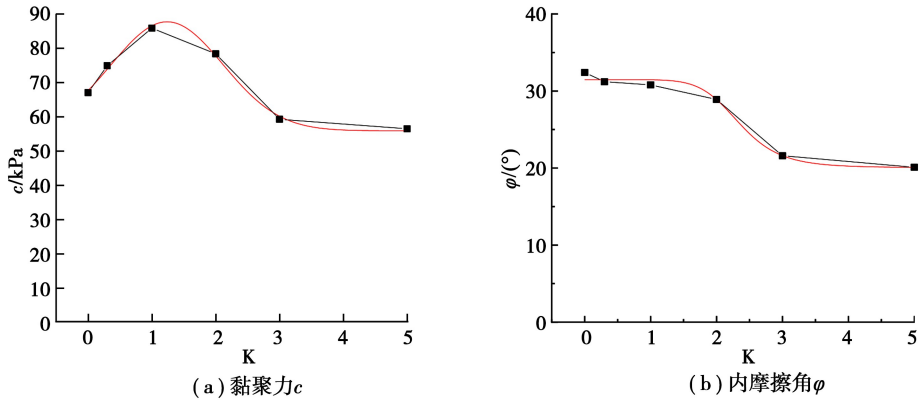


图 3 黏聚力、内摩擦角随含盐量  $K$  变化曲线

Fig. 3 Curves of cohesion, angle of internal friction with salt content  $K$

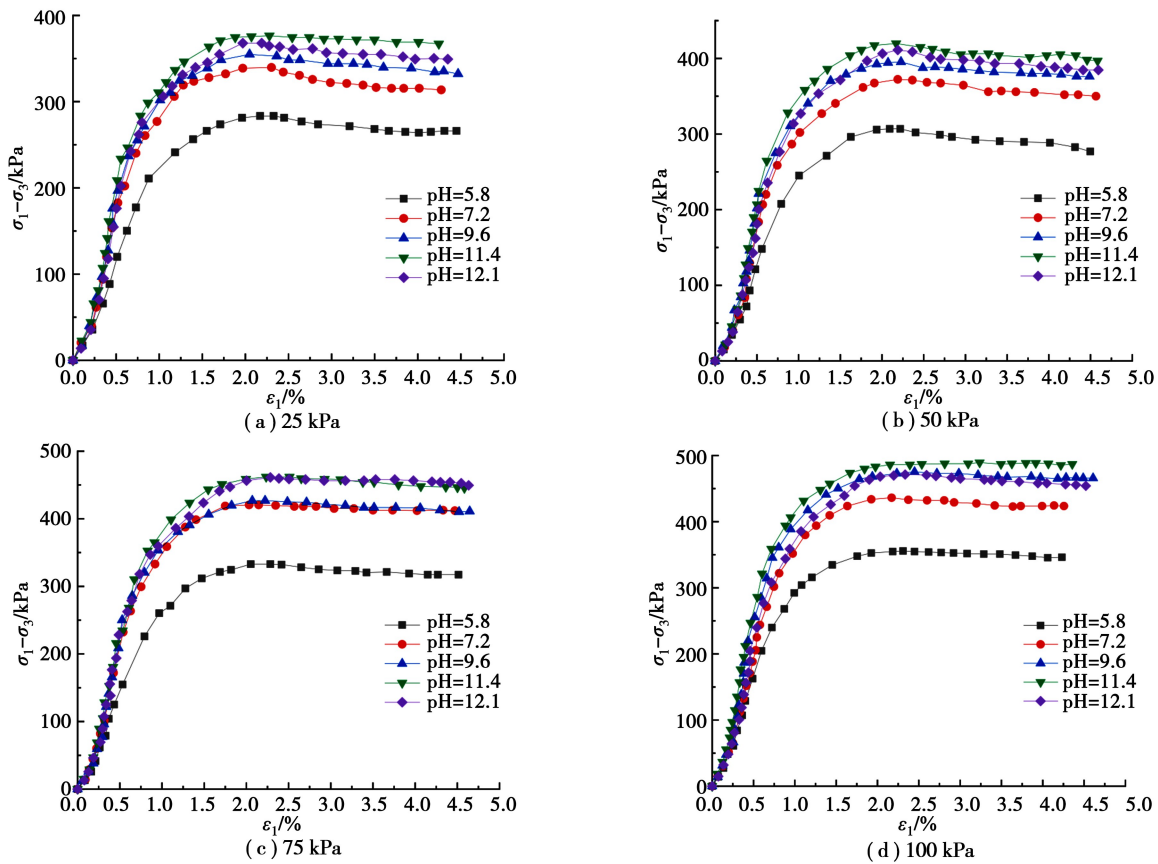


图 4 不同围压下  $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \varepsilon_1$  随 pH 值变化曲线

Fig. 4 Variation curves of  $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \varepsilon_1$  with pH under different enclosure pressures

大、pH=9.6 和 pH=12.1 抗剪强度次之,抗剪强度最小的是 pH=5.8。当吹填固化轻质土 pH=5.8 时,溶液中的  $H^+$  会中和土中的  $OH^-$  产生中和反应,从而影响阻碍了固化剂的胶结物质的生成,使得吹填固化轻质土的抗剪强度降低,当初始 pH 值较低(酸性)时,土体出现应变软化现象;当初始 pH 值较高(碱性)时,土体出现应变硬化现象。在围压较小时,碱性条件下其应变硬化现象显著,围压可使抵抗破坏的强度增高。

根据 4 种围压下的摩尔圆包络线分析计算出  $c, \varphi$  值如图 5 所示。

由图 5 可得,随 pH 值增大,黏聚力先增大后减小,于 pH=11.4 时达到最大值 111.48 kPa,而内摩擦角随 pH 增大而增大,且在 pH 值较低时增幅较明显,pH>7.4 后较稳定。这是因为在碱性环境下,试样中具有较多的  $OH^-$ ,使得反应更加完全。在后文微观试验中也可以观察到产生了较多的针状棒状或纤维状水化物质,使土颗粒之间的孔隙得

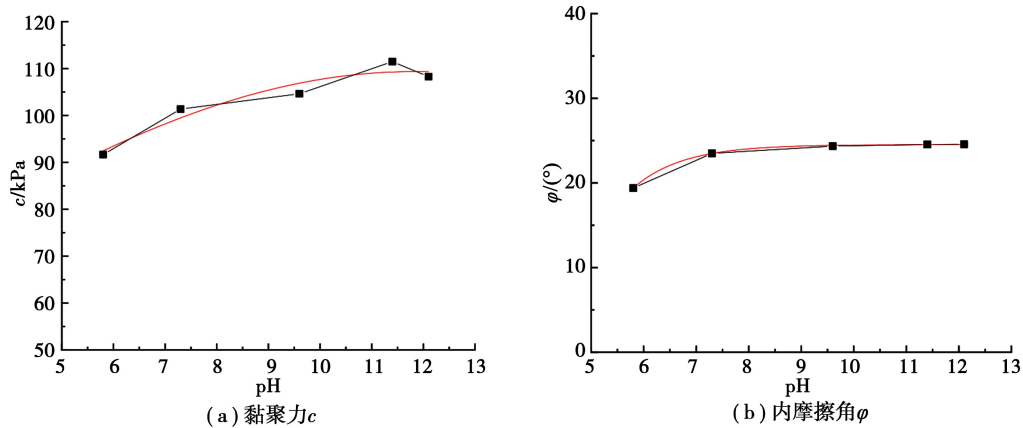


图 5 黏聚力、内摩擦角随 pH 值变化曲线

Fig. 5 Variation curves of cohesion and angle of internal friction with pH value

到了填补,促进土颗粒之间的咬合接触逐渐增大,加强了颗粒间联结,内摩擦角相应的逐渐增大。

### 3 微观机理分析

本节通过氮气吸附实验和扫描电镜试验研究了吹填固化轻质土的微观构造特征,如比表面积,孔隙大小、土颗粒之间的水化物特征等,考虑多因素(不同密度、含盐量、pH 值)的影响下吹填固化轻质土微观机理的变化情况,揭示其强度变化

规律。

#### 3.1 吹填固化轻质土比表面积及孔径分析

取密度为  $1.0\rho_0$ 、 $1.1\rho_0$ 、 $1.2\rho_0$ 、 $1.3\rho_0$  的吹填固化轻质土养护 28 d,取养护龄期 7 d、14 d、28 d 的吹填固化轻质土(密度  $1.0\rho_0$ ) 进行氮气吸附试验,观察密度及养护龄期对吹填固化轻质土比表面积和孔隙变化的影响规律,如图 6 所示。

##### 3.1.1 不同密度

大量的研究表明,当  $P/P_0$  在 0.05~0.35 之间,

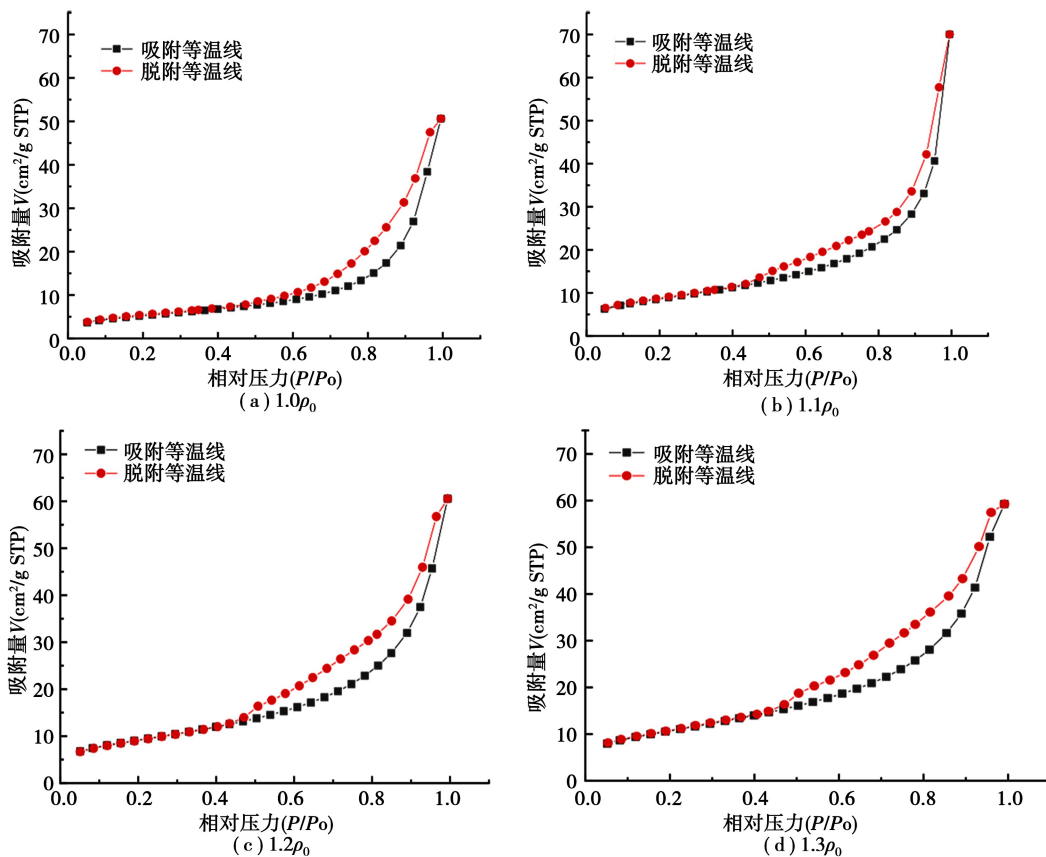


图 6 氮气吸附 Log 等温线

Fig. 6 Nitrogen adsorption Log isotherms

吸附等温线属于线性分布,满足 BET 二项常数公式,对数据进行处理得到图 7。

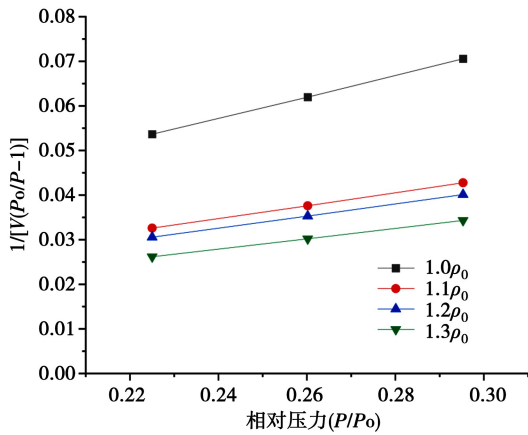


图 7 BET 曲线

Fig. 7 BET curve

分析曲线得公式(5),式中字母取值见表 9。

$$1/[V(P_0/P - 1)] = AP/P_0 + B \quad (5)$$

表 9 计算参数表

Table 9 Calculated parameters

密度/ $\rho_0$	A	B	$R^2$
1.0	0.230 89	0.002 00	0.999 61
1.1	0.13987	0.001 29	0.999 85
1.2	0.132 46	0.000 89	0.999 85
1.3	0.112 81	0.000 93	0.999 89

分析 BET 曲线及表 9,可以得到吹填固化轻质土比表面积如表 10。

表 10 吹填固化轻质土随密度的比表面积

Table 10 Specific surface area of blow-fill cured lightweight soils with density

密度/ $\rho_0$	SSA(比表面积)/( $m^2 \cdot g^{-1}$ )
1.0	18.689 6
1.1	30.833 8
1.2	32.638 1
1.3	38.268 1

表 11 中数据可得,吹填固化轻质土随密度增大,由于单位质量内吹填固化轻质土颗粒比表面积相对增加,颗粒或团粒之间的距离减少,颗粒间胶结作用增强导致比表面积增大。体现为前文所述吹填固化轻质土强度随密度增大而增强。

由图 8 可得,以 BJH 孔径分布理论,不同密度的吹填固化轻质土微孔范围内的最可几孔径在 4 nm 左右,中孔范围内的  $1.0\rho_0$  最可几孔径在

10 nm, $1.1\rho_0$  最可几孔径在 35 nm, $1.2\rho_0$  最可几孔径在 22 nm, $1.0\rho_0$  最可几孔径在 23 nm。

表 11 计算参数

Table 11 Calculation parameters

龄期/d	A	B	$R^2$
7	0.131 25	0.001 30	0.999 97
14	0.141 71	0.000 16	0.999 57
28	0.141 71	0.001 61	0.999 57

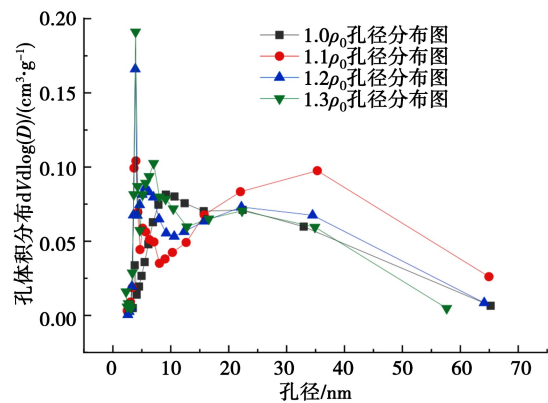
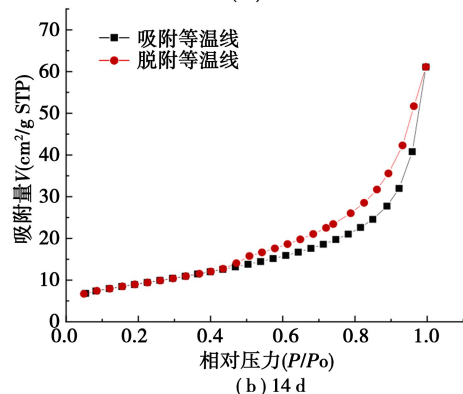
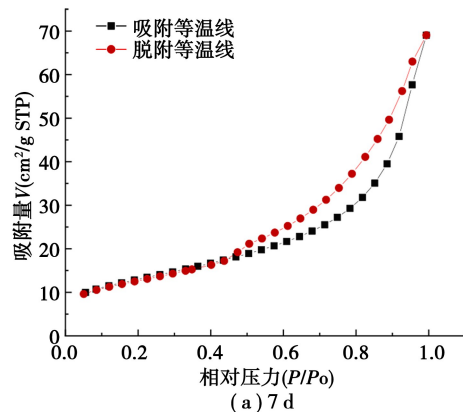


图 8 BJH 孔径分布随密度变化

Fig. 8 Variation of BJH pore size distribution with density

### 3.1.2 不同养护龄期

不同养护龄期试样的氮气吸附 Log 等温线如图 9。



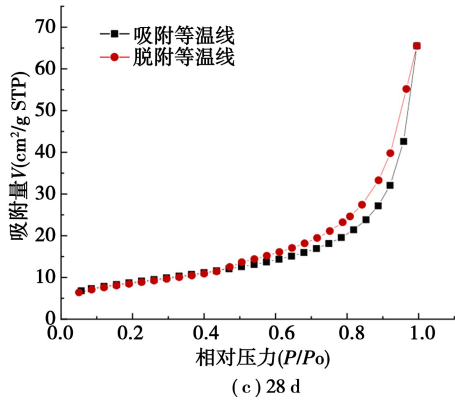


图 9 不同养护龄期下氮气吸附 Log 等温线  
Fig. 9 Nitrogen adsorption Log isotherms at different conservation ages

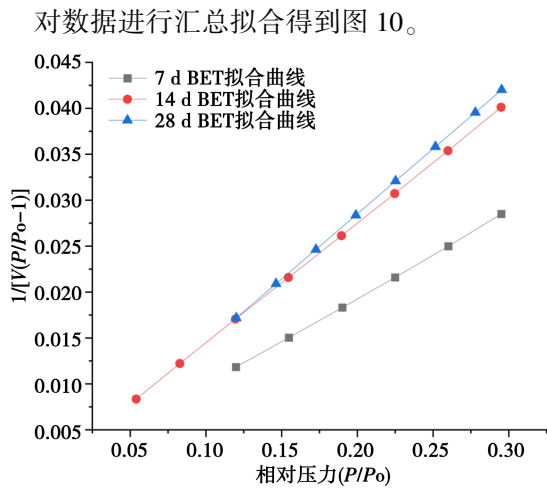


图 10 BET 曲线  
Fig. 10 BET curves

分析拟合曲线得公式 (6), 式中字母取值见表 11。

$$1/[V(P_0/P - 1)] = AP/P_0 + B \quad (6)$$

分析可得到吹填固化轻质土比表面积如表 12。

表 12 吹填固化轻质土随龄期的比表面积变化  
Table 12 Variation of specific surface area with age for blow-fill cured lightweight soils

龄期/d	SSA(比表面积)/(m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> )
7	45.68
14	32.83
28	30.67

从表 12 中的比表面积变化可以看出, 7~14 d 比表面积改变了 28.13%, 14~28 d 比表面积趋于稳定。这是由于随着龄期的增长, 固化轻质土内部生成的水化产物逐渐增多, 填充了土颗粒之间的孔

隙, 进而使得比表面积越来越小。而至养护后期, 土颗粒之间的水化物会胶结在一起, 导致吹填固化轻质土强度随龄期增长而增长且在 28 d 时趋于稳定。

从图 11 中的孔径分布变化可以看出, 随着龄期的增长, 吹填固化轻质土的孔径在减小, 这是因为 28 d 之前, 土体内部不断生成水化物, 从而使得孔径在不断减小; 且养护前期 (7~14 d) 孔径变化程度比后期 (14~28 d) 变化程度大, 反映前文所述当养护龄期到达 28 d 时, 强度基本稳定。

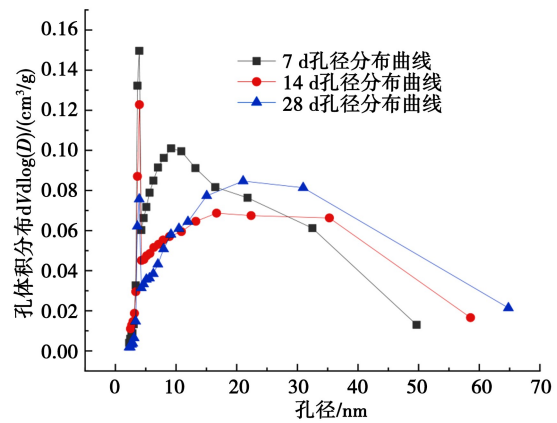


图 11 BJH 孔径分布随龄期变化曲线  
Fig. 11 Variation curve of BJH pore size distribution with age

### 3.2 SEM 扫描电镜分析

分别制备 1.0、1.1、1.2、1.3 密度的吹填固化轻质土, 含盐量分别为 0%、0.3%、1%、2%、3%、5% 共 6 种不同含盐量的吹填固化轻质土及 pH = 5.8、7.3、9.6、11.4、12.1 的吹填固化轻质土, 分别养护 28 d。将合适规格的吹填固化轻质土进行冷冻、抽真空等步骤去除吹填固化轻质土中的游离水, 在真空干燥后的样品表面喷涂导电层, 然后用扫描电镜对样品进行拍照。

#### 3.2.1 不同密度影响

本试验选取放大 5 000 倍来对天津滨海黏土和 4 种不同密度的吹填固化轻质土进行扫描电镜试验, 得到图 12、13。

对比图 12、图 13(a) 可知, 吹填固化轻质土较普通吹填软土有更大的孔隙, 颗粒群之间胶结较多, 这也是吹填固化轻质土较普通路基软土质量更轻, 强度增强, 渗透系数大的原因。

由图 13 中可以看出, 随着密度的增加, 可以看到单位面积上的颗粒含量相对增加, 且颗粒以及颗粒群之间的距离减少, 联结更多, 更紧密, 孔隙越来越小。从而反映了宏观力学上的土体强度随密度的增加而显著增强。

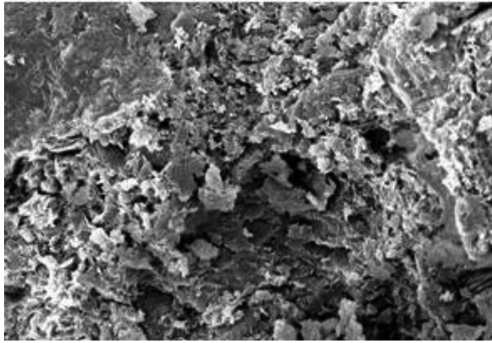


图 12 天津滨海吹填软黏土 5 000 倍扫描电镜图  
Fig. 12 5 000× SEM images of soft clay blown in Tianjin Binhai

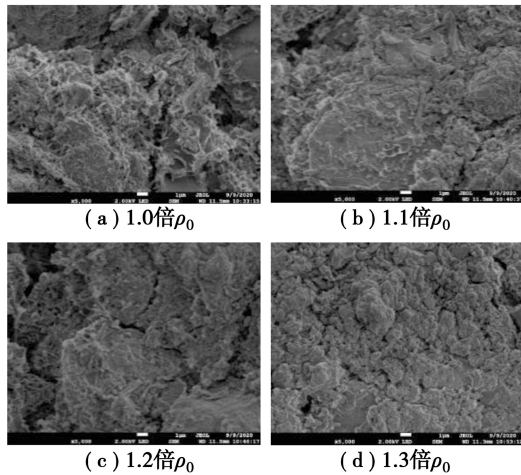


图 13 不同密度下吹填固化轻质土 5 000 倍扫描电镜图

Fig. 13 Scanning electron microscope image of blow-fill cured lightweight soil at different densities 5 000×

### 3.2.2 不同含盐量影响

本试验选取放大 10 000 倍来对 6 种不同含盐量的吹填固化轻质土进行扫描电镜试验,得到图 14。

由图中可以看出,当含盐量较小时 (<1%),随着含盐量的增加,出现少量纤维针棒状物质,盐分填充了一部分孔隙,起到了一定的骨架作用。当含盐量较大时 (>3%),吹填固化轻质土产生了一些微小的裂缝,这是因为过高含盐量发生结晶,引起土壤膨胀产生微小裂缝,影响了固化土的密实性。从微观结构上解释了前文所述吹填固化轻质土强度随含盐量增加先增大后减小的结论。

### 3.2.3 不同 pH 值影响

本试验选取放大 10 000 倍来对 5 种不同 pH 值的吹填固化轻质土进行扫描电镜试验,得到图 15。

从图 15 中可以看出,当初始 pH 值 = 5.8 时,吹填固化轻质土之间的胶结状态较差,这说明当处

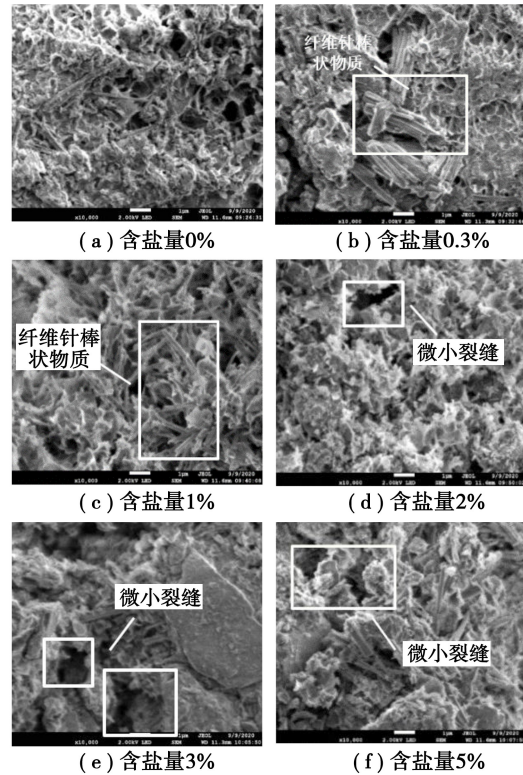


图 14 不同含盐量下吹填固化轻质土 10 000 倍扫描电镜图

Fig. 14 10 000× scanning electron microscope image of blow-fill cured lightweight soil with different salt content

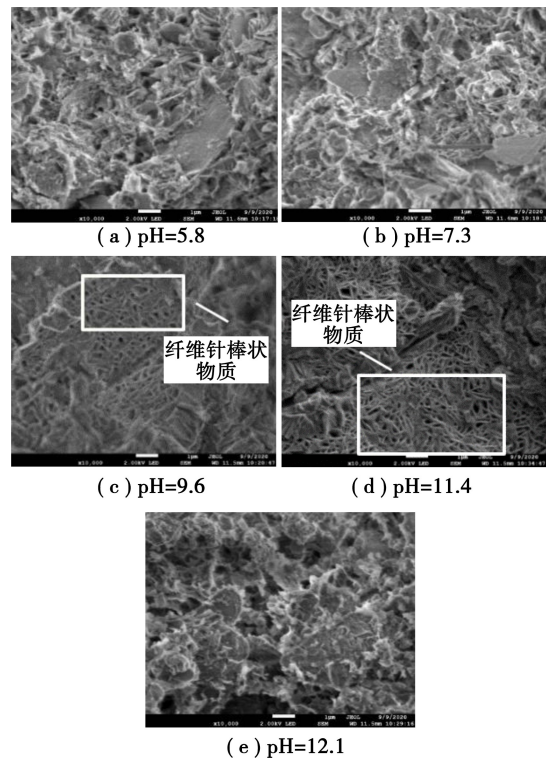


图 15 不同 pH 值下吹填固化轻质土 10 000 倍扫描电镜图

Fig. 15 10 000× scanning electron microscopy of blowfill cured lightweight soil at different pH values

于酸性条件下,使得吹填固化轻质土的反应不够充分,阻碍了水化物的生成,从而显示出的宏观力学特性上是强度的减弱,当初始 pH 值 $>7.3$ 时,也就是处于碱性条件下,随着碱性的增强,吹填固化轻质土的胶结状态逐渐增强,尤其是当 pH 值 $=11.4$ 时,可使吹填固化轻质土中含有大量的  $\text{OH}^-$ ,吹填固化轻质土之间形成了大量的纤维针棒状物质或纤维状胶结体,填充了吹填固化轻质土的孔隙,加强了颗粒间联结,从而提高了吹填固化轻质土强度。而当初始 pH 值大于 11.4 时,从图中看出,胶凝物质较 pH $=11.4$  时生成减少,这是因为过量的  $\text{OH}^-$  会阻碍部分水化反应的进行,胶凝物质生成减少,导致土体强度较之前有所下降。

#### 4 总结

(1)密度、pH 值、含盐量等因素对吹填固化轻质土强度有影响作用。表现为其强度与密度呈正相关,pH 值和含盐量的提高,会在一定程度内促进吹填固化轻质土强度,但超过一定量后,会对其强度增长起抑制作用。

(2)含盐量和 pH 值较低时,吹填固化轻质土都出现应变软化现象,随着含盐量和 pH 值增高,土体出现应变硬化现象。力学性能上随着含盐量的增加土体黏聚力先增大后减小,内摩擦角逐渐减小,pH 值增加会导致其黏聚力和内摩擦角逐渐增大。

(3)吹填固化轻质土中含有非常多的纤维针棒状胶结物质作为土颗粒骨架;随着密度的增大,吹填固化轻质土颗粒含量相对增加;随着含盐量的增大,吹填固化轻质土的孔隙先减小后增大,并在高含盐量下会产生微小的裂缝;碱性条件下更有利于土颗粒之间的胶结状态。观测土体微观结构证明了吹填固化轻质土强度变化规律。

#### 参考文献(References)

- [1] 龙开荃,方祥位,申春妮,等.复合型早强土壤固化剂固化淤泥强度特性研究[J].岩土力学,2023,44(增1):309-318. (Long Kaiquan, Fang Xiangwei, Shen Chunni, et al. Strength characteristics of sludge solidified by composite rapid soil stabilizer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023,44(Supp. 1):309-318. (in Chinese))
- [2] 李丽华,黄畅,李文涛,等.稻壳灰-矿渣固化膨胀土力学与微观特性研究[J].岩土力学,2023,44(10):2821-2832,2842. (Li Lihua, Huang Chang, Li Wentao, et al. Study on mechanical and microscopic characterization of expansive soil solidified by rice husk ash-granulated blast furnace slag[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44 ( 10 ): 2821-2832, 2842. (in Chinese))
- [3] 李文涛,孙章皓,庄妍,等.氧化镁复合水泥固化硫酸盐渍土的力学、膨胀性能及微观机理[J].岩土工程学报,2024,46(9):1840-1848. (Li Wentao, Sun Zhanghao, Zhuang Yan, et al. Mechanical and swelling properties, along with micro-mechanism of sulfate-bearing soil stabilized with magnesium oxide and cement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024,46(9):1840-1848. (in Chinese))
- [4] 丰土根,厉治平,张箭,等.基于二氧化碳泡沫水泥浆的淤泥固化研究[J].岩土工程学报,2024,46(12):2538-2547. (Feng Tugen, Li Zhiping, Zhang Jian, et al. Study on Sludge Solidification Based on Carbon Dioxide Foam Cement Slurry [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46 ( 12 ): 2538-2547. (in Chinese))
- [5] 金胜赫,王修山,吴越鹏.矿渣-脱硫石膏-电石渣固化剂固化黏土的研究[J].工程地质学报,2023,31(2):397-408. (Kim Sunghyok, Wang Xiushan, Wu Yuepen. Study on modification of marine clay treated with new GDC soil stabilizer [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31 ( 2 ): 397-408. (in Chinese))
- [6] 杜延军,蒋宁俊,王乐,等.水泥固化锌污染高岭土强度及微观特性研究[J].岩土工程学报,2012,34(11):2114-2120. (Du Yanjun, Jiang Ningjun, Wang Le, et al. Strength and microstructure characteristics of cement-based solidified/stabilized zinc-contaminated kaolin [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34 ( 11 ): 2114-2120. (in Chinese))
- [7] 杨爱武,王韬,许再良.石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究[J].工程地质学报,2015,23(5):996-1004. (Yang Aiwu, Wang Tao, Xu Zailiang. Experimental study on lime and its additional agent to cure tianjin marine soft soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2015 ( 5 ): 996-1004. (in Chinese))
- [8] Jo A N, Hafez M A, Norbaya S. Study of bearing capacity of lime-cement columns with pulverized fuel ash for soil stabilization using laboratory model[J]. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2011(16):1595-1605.
- [9] 林彤,刘祖德.粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J].岩土力学,2003,24(6):1049-1052. (Lin Tong, Liu Zude. Study on indoor tests of fly ash and quick lime improving soft soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6):1049-1052. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] Consoli N C, Rosa D A, Cruz R C, et al. Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil [J]. *Engineering Geology*, 2011, 122 (3): 328-333.
- [12] 雷华阳,许英刚,李鑫,等.聚丙烯酰胺改性石灰固化吹填土固结特性研究[J].*岩土工程学报*,2017,39(增2):107-111. (Lei Huayang, Xu Yinggang, Li Xin, et al. Experimental study on consolidation characteristics of polyacrylamide-modified lime-stabilized dredger fill [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39 (Supp. 2): 107-111. (in Chinese))
- [13] 杨少朋,杨爱武,郎瑞卿.干湿循环作用下吹填固化轻质土蠕变特性研究[J].*防灾减灾工程学报*,2024,44(2):478-487. (Yang Shaopeng, Yang Aiwu, Lang Ruiqing. Research on creep characteristics of blow-filled cured lightweight soils under the action of wet-dry cycles [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024,44(2):478-487. (in Chinese))
- [14] 杨浩,朱剑锋,陶燕丽.3种因素影响下固化废弃淤泥的微观特性研究[J].*水文地质工程地质*,2022,49(4):91-99. (Yang Hao, Zhu Jianfeng, Tao Yanli. Research on the micro-characteristics of solidified waste sludge under the effect of three factors [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022,49(4):91-99. (in Chinese))
- [15] 朱剑锋,汪正清,陶燕丽,等.电石渣-草木灰复合固化剂固化废弃软土微观特性研究[J].*土木工程学报*,2023,56(10):180-189. (Zhu Jianfeng, Wang Zhengqing, Tao Yanli, et al. Study on micro characteristics of waste soft soil solidified by calcium carbide slag plant ash composite curing agent [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023,56(10):180-189. (in Chinese))
- [16] 李建东,王旭,张延杰,等.F1离子固化剂加固黄土强度及微观结构试验研究[J].*东南大学学报(自然科学版)*,2021,51(4):618-624. (Li Jiandong, Wang Xu, Zhang Yanjie, et al. Experimental study on strength and microstructure of loess reinforced with F1 ionic soil stabilizer [J]. *Journal of Southeast University (natural science edition)*, 2021, 51 (4): 618-624. (in Chinese))
- [17] 吕擎峰,周刚,王生新,等.固化盐渍土核磁共振微观特征[J].*岩土力学*,2019,40(1):245-249,259. (Lv Qingfeng, Zhou Gang, Wang Shengxin, et al. Microstructure characteristics of solidified saline soil based on nuclear magnetic resonance [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019,40(1):245-249,259. (in Chinese))
- [18] 王东星,王宏伟,王瑞红.活性MgO-粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J].*岩石力学与工程学报*,2019,38(增2):3717-3725. (Wang Dongxing, Wang Hongwei, Wang Ruihong. Micro-mechanisms of dredged sludge solidified with reactive MgO-fly ash [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Supp. 2):3717-3725. (in Chinese))
- [19] 王东星,肖杰,李丽华,等.基于碳化-固化技术的武汉东湖淤泥耐久性演变微观机制[J].*岩土力学*,2019,40(8):3045-3053. (Wang Dongxing, Xiao Jie, Li Lihua, et al. Micro-mechanism of durability evolution of sludge dredged from East Lake, Wuhanbased on carbonation-solidification technique [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019,40(8):3045-3053. (in Chinese))
- [20] 吴燕开,张通,徐艺中,等.基于分形理论的固化土微观结构变化特性[J].*科学技术与工程*,2023,23(7):2960-2967. (Wu Yankai, Zhang Tong, Xu Yizhong, et al. Microstructure Change Characteristics of Solidified Soil Based on Fractal Theory [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23 (7): 2960-2967. (in Chinese))
- [21] 吴雪婷,项伟,王臻华,等.离子土固化剂固化淤泥的微观机理研究[J].*工程地质学报*,2018,26(5):1285-1291. (Wu Xueting, Xiang Wei, Wang Zhenhua, et al. Microscopic Mechanism of Solidified Silt with Ionic Soil Stabilizer [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018,26(5):1285-1291. (in Chinese))
- [22] 王东星,王宏伟,邹维列,等.碱激发粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J].*岩石力学与工程学报*,2019,38(增1):3197-3205. (Wang Dongxing, Wang Hongwei, Zou Weilie, et al. Research on micro-mechanisms of dredged sludge solidified with alkali-activated fly ash [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019,38(Supp. 1):3197-3205. (in Chinese))
- [23] 杨爱武,王韬,许再良.石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究[J].*工程地质学报*,2015,23(5):996-1004. (Yang Aiwu, Wang Tao, Xu Zailiang. Experimental Study on Lime and its Additional Agent to Cure Tianjin Marine Soft Soil [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23 (5): 996-1004. (in Chinese))
- [24] 张亭亭,李江山,王平,等.磷酸镁水泥固化铅污染土的力学特性试验研究及微观机制[J].*岩土力学*,2016,37(增2):279-286. (Zhang Tingting, Li Jiangshan, Wang Ping, et al. Experimental study of mechanical and microstructure properties of magnesium phosphate cement treated lead contaminated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37 (Supp. 2): 279-286. (in Chinese))