

# 软土固化材料研究进展

徐日庆<sup>1,2</sup>, 张白羚<sup>1,2</sup>, 张岗平<sup>3</sup>, 闫自海<sup>3</sup>, 徐启良<sup>3</sup>, 俞天赐<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

**摘要:** 随着对软土固化材料研究的不断深入, 其在土壤固化领域的应用受到了广泛的关注。软土固化材料是一种节能环保的工程材料, 用其处理软土可有效解决施工难、耗时长和成本高的问题, 且具有工程适应性强、用量少、绿色环保等特点, 应用范围十分广泛。为明确软土固化材料对土壤的加固机理和增强效果, 本文回顾了近年来不同种类软土固化材料的研究进展, 介绍了无机、有机、生物酶和离子4类软土固化材料的固化机理, 对这4类固化土的无侧限抗压强度、抗剪强度等力学性能, 以及在水稳定性、干湿循环和冻融循环等条件下的稳定性进行总结。在此基础上, 本文归纳了软土固化材料的优缺点和适用范围, 并结合现有研究指出有待进一步探讨的问题, 为软土固化材料的未来发展提供参考。

**关键词:** 软土固化; 固化机理; 力学性能; 稳定性; 土壤固化剂; 应用范围

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)04-0377-11

## Research progress of soft soil stabilizer

XU Riqing<sup>1,2</sup>, ZHANG Bailing<sup>1,2</sup>, ZHANG Gangping<sup>3</sup>, YAN Zihai<sup>3</sup>, XU Qiliang<sup>3</sup>, YU Tianci<sup>1,2</sup>

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. Engineering Research Center of Urban Underground Development of Zhejiang Province, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

3. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, Zhejiang, China)

**Abstract:** In the area of soil stabilization, there is growing interest in the utilization of soft soil stabilizers, which offer promising prospects for soil improvement practices. Soft soil stabilizers represent an eco-friendly and resource-efficient approach to soil treatment, offering viable solutions to the challenges associated with intricate, time-intensive, and costly construction endeavors. Characterized by their engineering versatility, minimal dosage requirements, and eco-conscious attributes, soft soil stabilizers have garnered widespread adoption. This work aims to elucidate the underlying reinforcement mechanisms and performance enhancement effects of soft soil stabilizers. By examining recent advancements, it comprehensively reviews the efficacy of various types of soft soil stabilizers, including inorganic, organic, bio-enzymatic, and ionic agents. Through an analysis of the curing mechanisms and mechanical properties, such as unconfined compression strength and shear strength, this work sheds light on the stability of soil treated with these stabilizers under different conditions, including water stability, dry and wet cycles, and freeze-thaw cycles. Additionally, it offers a nuanced evaluation of the advantages, drawbacks, and application domains of soft soil stabilizers. Furthermore, this work identifies areas warranting further investigation, thus serving as a valuable reference for future research endeavors in the field of soft soil stabilizer.

**Key words:** soft soil stabilization; curing mechanism; mechanical properties; stability; soil stabilizer; applications

## 0 引言

软土是一种抗剪强度较低、压缩性较高、渗透

性较小、天然含水率较大的饱和黏性土, 其主要类型是淤泥和淤泥质土<sup>[1]</sup>。淤泥质土是指天然含水率大于液限、天然孔隙比在 1.0~1.5 之间的黏性土<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2022-10-17

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2019C03103)。

作者简介: 徐日庆(1962—), 男, 浙江金华人, 博士, 教授, 主要从事软土的微观结构、土的工程性质、本构模型、软土固化、地基处理、地下工程及城市地下空间开发等方面的研究工作。E-mail: xurq@zju.edu.cn。

这种土主要分布在我国东南沿海地区和内陆的大江、大河、大湖沿岸及周边。近年来,随着我国城镇化建设的快速推进,城市边界向四周不断扩张,越来越多的工程修建在软土地基上。由于其压缩性较高、强度低、地基沉降大,且多为不均匀沉降,极易造成建筑物墙体开裂、建筑物倾覆,不宜直接用于工程建设,需要对其进行加固处理。

针对软土的浅层加固技术主要分为以下几种:

(1) 使用强夯、堆载预压等方法加固软土;(2) 利用桩基加固;(3) 使用固化材料处理。由于软土的强度极低,强夯、堆载预压等方法在原始的软土地基上难以实施且耗时较长,桩基加固造价较高,而使用固化材料处理不仅可有效解决施工难、耗时长和成本高的问题,还具有工程适应性强、经济性好、

绿色环保等特点,非常适合作为浅层加固技术的首选。

因此,本文从固化机理、固化后软土力学性能和稳定性方面进行归纳总结,探讨软土固化材料及固化后软土可能存在的问题,以期对固化材料研究及其工程应用提供有益借鉴。

## 1 软土固化材料的固化机理

软土固化材料的种类繁多,根据固化材料的化学成分与固化机理,可以将其分为无机类固化材料、有机类固化材料、生物酶类固化材料和离子类固化材料<sup>[3]</sup>,各类固化材料的适用范围及固化土性能保持时间如表1所示<sup>[4]</sup>。

表1 固化材料的适用范围及固化土性能保持时间

Table 1 Scope of application of soil stabilizers and retention time of solidified soil properties

固化材料类别	适用范围	固化土性能保持时间
无机类	适用于黏土、粉土、砂土等各类土壤	30~100年
有机类	适用于黏土、粉土以及膨胀土、黄土、红黏土等特殊土	30年
生物酶类	适用于细粒黏土、含有机质的黏土;不适用于淤泥、粗粒土	8~10年
离子类	与有机类固化材料类似	30年

### 1.1 无机类固化材料固化机理

无机化合物类固化材料一般为粉末状,传统无机类固化材料多采用水泥、石灰、粉煤灰,新型无机类固化材料,如地质聚合物等,大多是选用高炉矿渣、电石渣等工业废料作为主固化材料,添加某些酸、碱、盐类激发材料配制而成,如氯盐、硫酸盐、氢氧化钠等<sup>[5]</sup>,可有效替代水泥、石灰等传统无机固化剂。无机类材料固化机理大多类似,主要通过以下4个过程实现对软土的固化:

(1) 水化过程:主固化材料与土壤中的水发生水解反应和水化反应,生成凝胶状水化物,根据主固化材料成分的不同,水化物可分为水化硅酸钙、水化铝酸钙等。这些水化物一方面能自身硬化形成骨架,另一方面能胶结土颗粒并填充土壤间细小空隙,形成稳定的网状结构,大大增强土壤稳定性<sup>[6]</sup>。

(2) 离子交换过程:黏土颗粒表面常吸附 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{H}^+$ 等活性强的低价阳离子,当固化材料与水发生反应后产生 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 等高价阳离子,会与低价阳离子间进行离子交换,使土颗粒外表面双电层减弱,土颗粒聚集成团,进而提高了土体强度和稳定性。

(3) 晶化过程:一些固化材料与土混合后会产生钙矾石针状结晶体,使土壤中大量的自由水以结

晶水的形式被固定下来,而且,这种结晶体相互交错,有效填充土颗粒间的空隙,增强了土壤的强度<sup>[7]</sup>。

(4) 碳化作用:空气中的二氧化碳通过土体孔隙等通道进入土体,和前期水化产物(如氢氧化钙、水化硅酸钙和水化铝酸钙等)反应生成碳酸钙,碳酸钙覆盖于固化体表面,增强土体水稳性,同时降低孔隙溶液pH值,减少孔隙体积。

此类固化材料的缺点是材料用量一般较大,运输成本高,早期强度不高;优点是成本低,强度稳定性好,且能采用工业废渣作为主固化材料,符合绿色环保理念。

### 1.2 有机类固化材料固化机理

有机高分子类固化材料一般为液态,可分为磺化油类、环氧树脂类、改性水玻璃类及高分子材料类,由其中的一种或多种配制而成<sup>[8]</sup>。有机类固化材料对土壤含水率要求严格,若土壤含水率过高,则无法达到理想的固化效果。当遇到含水率较高的土壤时,通常可采用絮凝剂与水泥等无机材料结合的方式进行处理,絮凝剂可分为有机和无机两大类,有机絮凝剂主要是聚丙烯酰胺等。有机类固化材料主要通过氢键、阳离子交换作用(交换土壤中的水分电荷与颗粒电荷),与土壤形成紧密的连接

结构,发生聚合反应,形成高分子链,能够扩散、渗透和缠绕到被加固土体的界面内,与界面内的土壤颗粒发生化学反应并胶结土壤颗粒,形成一个整体,而且生成的高分子链有位阻屏蔽作用,可提高固化土壤的抗渗透能力。

此类固化材料的缺点是固化土使用寿命受环境和土壤含水率的影响较大,抗水性差;优点是固化材料用量少,便于运输,施工方便,固化土强度易于控制。

### 1.3 生物酶类固化材料固化机理

生物酶类固化材料为液体状,是由有机物质发酵而成,具有良好的固结性和稳定性。将其加入土壤中,通过其自身的催化作用,软土中大量的有机大分子结合形成中间反应酶,从而削弱软土吸水能力,降低软土亲水性,形成防水土层。经外力挤压密实后,软土之间黏合性增强,有效提高土体强度和稳定性<sup>[9]</sup>。该类固化材料的典型代表为:派酶(PermaZyme)土壤固化材料和泰然酶(TerraZyme)土壤固化材料。

此类固化材料的缺点是固化土使用寿命短,且浸水后强度会降低;优点是对土壤没有污染,施工简便,性价比高,可增加土壤密度,降低土壤膨胀性。

### 1.4 离子类固化材料固化机理

离子类固化材料一般为水溶性液体,是由多个强离子组合形成的化学物质,主要含有 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等阳离子和 $\text{Cl}^{-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^{-}$ 等阴离子<sup>[10]</sup>,常见的离子类固化材料有EN-1、ISS、CHF、Toogood等。离子类固化材料溶于水后,形成大量的阴阳离子,与土壤表面吸附的阳离子发生反应,进行离子

交换,使土壤颗粒表面电荷减少,从而减小双电层的厚度,降低土颗粒间的排斥力,使土颗粒间聚集,从而使土体更加密实。另外,离子类固化材料由亲水头和疏水尾组成<sup>[11]</sup>,亲水头与土颗粒表面的金属阳离子结合形成化学链,从而增强土体强度;疏水尾阻止水分进入,使得土体由亲水性变为憎水性,排除部分吸附水,当土体受到夯击和机械振动时更易提高密实度。

此类固化材料的缺点是固化过程易受到环境影响,抗水性能差,不适用于 $\text{pH}>7$ 的碱性土壤;优点是成本低,施工方便,易于运输。

## 2 固化土研究现状

在实际工程中,软土固化材料适用范围非常广泛。同一固化材料并不能满足所有的固化目标,软土固化材料之间存在差异,主要是由于固化机理不同,导致其改善土体的力学性能、耐久性能等指标有所差异。

罗莎<sup>[12]</sup>研究了4种固化材料在其最佳掺量时对同种黏土的固化效果,具体如表2所示。该黏土标准养护7d的无侧限抗压强度仅为0.42 MPa,浸水后约1h强度完全丧失。由此可见,仅针对土体固化后强度而言,4类固化材料均有效果,其中,无机类固化材料效果比其他3类更好,而不同的无机类固化材料的固化效果也有差异。针对土体固化后水稳性而言,只有无机类固化材料有效果,其余3类固化材料没有改变土浸水后强度丧失的特性。因此,有必要分析不同类型软土固化材料对软土力学性能和耐久性能的影响。

表2 不同类型软土固化材料对同种黏土的固化效果对比<sup>[12]</sup>

Table 2 Comparison of the curing effects of different types of soft soil stabilizers on the same clay<sup>[12]</sup>

土壤指标	类型	固化材料名称	掺量	7 d 无侧限 抗压强度/MPa	浸水 1 d 后 固化土强度/MPa	水稳系数
$\omega_L$ : 39.1% $\omega_P$ : 20.3%	无机类	奥特赛特	12%	3.68	2.54	0.69
		HAS 高性能土壤固化材料	12%	3.91	2.89	0.74
		NG 土壤固化材料	12%	2.98	1.65	0.55
		内蒙古高性能土壤固化材料	12%	2.76	1.72	0.62
$G_s$ : 2.68	有机类	WSP 高分子有机土壤固化材料	0.03%	0.65	—	—
	生物酶类	帕尔玛土壤固化材料	0.30 L/m <sup>3</sup>	0.72	—	—
	离子类	ISS 土壤固化材料	0.35 L/m <sup>3</sup>	0.70	—	—

### 2.1 无机类软土固化材料

在软土固化技术中,无机类固化材料是适用最为广泛的一类,国内外学者对此开展了大量的研

究,主要成果数据见表3。

无机类软土固化材料主要以固化土的无侧限抗压强度为指标,力学性能研究主要集中在固化时

间、固化材料掺量、养护环境和养护龄期等因素对固化土无侧限抗压强度的影响, 稳定性能研究主要

集中在水稳定性、干湿循环特性和冻融循环特性等方面, 其他研究内容较少。

表3 无机类软土固化材料研究汇总

Table 3 Summary of research on inorganic soft soil stabilizers

参考文献	软土类型	$\omega_L/\%$	$\omega_P/\%$	固化材料掺量	强度变化	稳定性变化
[13]	软黏土	42.36	24.27	水泥: 10%; 液态硅酸钠: 2%; 氢氧化钠: 4%; 氯化钙: 4%	UCS: 489.2 kPa (7 d)、739.4 kPa (28 d)、917.6 kPa (60 d)	—
[14]	淤泥	42.30	24.00	粉煤灰: 15%; 生石灰: 5%; 硅酸钠: 1.1%; 硫酸钙: 0.62%; 氯化钙: 0.28%	UCS: 118.3 kPa (3 d)、291.9 kPa (7 d)、623.8 kPa (28 d)	—
[15]	淤泥质黏土	36.30	22.90	水泥: 10%; 矿渣微粉: 4%; 石膏: 3%; 石灰: 1%; 超细水泥: 2%	原状土 UCS: 38.1 kPa; UCS: 520.0 kPa (7 d)、769.7 kPa (14 d)	—
[16]	淤泥质土	51.90	24.50	粉煤灰: 4.32%; 磷石膏: 5.36%; 电石渣: 10.32%	UCS: 212.3 kPa (3 d)、411.9 kPa (7 d)、1 013.1 kPa (28 d)	—
[17]	淤泥质黏土	37.50	21.10	GSC: 15%	UCS: 145.9 kPa (7 d)、1 287.0 kPa (14 d)、1 287.0 kPa (28 d)、1 943.6 kPa (60 d)、2 998.7 kPa (90 d)	—
[18]	淤泥质土	45.00	19.50	水泥: 15%; CX-13: 15%	UCS: 734.0 kPa (28 d)	—
[19]	低液限黏土	32.00	18.00	ISW 凝胶材料: 4%	UCS: 1.5 MPa (7 d)、4.1 MPa (28 d); CBR: 43.3% (原土为 9.6%); 劈裂强度: 0.35 MPa (7 d)、0.45 MPa (28 d)、0.59 MPa (90 d)	水稳定系数: 0.89; 干湿循环系数: 0.75 (28 d)、0.81 (90 d); 冻融后强度保留率: 72.2% (5次)、57.3% (10次)
[20]	淤泥质土	45.80	23.60	高炉矿渣: 6.32%; 粉煤灰: 1.73%; 电石渣: 6.96%	UCS: 1 479.3 kPa (28 d)	水稳定系数随含水率增加先变大后变小, 强度随干湿循环次数增加而降低
[21]	海相沉积土	44.50	25.10	GS 固化材料: 15%; 水泥: 20%	GS 固化土强度高于水泥土强度, 二者强度比为 2.03~2.81	—

注: UCS 均指无侧限抗压强度, CBR 均指加州承载比。

## 2.2 有机类软土固化材料

单独使用有机类固化材料时, 固化土的无侧限抗压强度较原状土有所提升, 但仍无法满足大多数工程的需求, 因此有机类固化材料常配合无机类固化材料一起使用, 如水泥、石灰等。

表4总结了近些年国内外学者的研究, 可知:

与无机类固化材料不同的是, 有机类固化材料的力学性能研究不仅集中于固化土的无侧限抗压强度, 还有关于抗剪强度、抗拉强度等方面的研究; 与无机类固化材料类似的是, 有机类固化材料的稳定性研究也主要集中在水稳定性、干湿循环特性和冻融循环特性等方面。

表 4 有机类软土固化材料研究汇总

Table 4 Summary of research on organic soft soil stabilizers

参考文献	软土类型	$\omega_L/\%$	$\omega_P/\%$	有机固化材料掺量	无机材料掺量	强度变化	稳定性变化
[22]	黏土	52.60	19.70	STW 聚合物: 30%	—	UCS: 241.5 kPa (3 d); $c$ 增加了 482%, $\phi$ 增加了 28.5° (2 d)	水稳定性 $K$ 增大了 3.57 倍, 土壤侵蚀率从 70.2% 降到 1.1%
[23]	淤泥	55.60	27.10	吸水树脂: 2.0%	水泥: 6%; 生石灰: 2%; 高铁酸钾: 0.5%	UCS: 4.098 MPa (7 d); $c$ : 72.4 kPa, $\phi$ : 21.8° (均高于掺 15% 水泥固化土); 压缩系数: 0.33 MPa <sup>-1</sup>	固化土浸水 14 d 后, 仅表面少量颗粒剥落; 12 次干湿循环后, 平均累计质量损失率仅为 3.89%, 无侧限抗压强度提高了 4.1%
[24]	淤泥土	34.00	21.00	SP (聚丙烯酸钠): 3.57%	生石灰: 1.43%	UCS: 2.4 MPa (7 d)	—
[25]	细粒土	76.50	37.00	PAM: 16g/L	—	UCS: 338.2 kPa (标准养护 7 d)、258.1 kPa (潮湿环境养护 7 d)	冻融循环 1 次后固化土抗压强度降低接近 60%, 5 次后抗压强度约为原强度的 10%; 原状土冻融循环 4 次完全破损
[26]	黏土	46.00	24.00	高聚物固化材料: 300 mL/m <sup>3</sup>	—	—	随着高聚物固化材料的掺量增加, 固化土强度损失率和吸水率逐渐减小
[27]	软土	38.40	18.20	吸水树脂 (SAP): 0.3%	水泥: 4%; 生石灰: 2%	UCS: 约 260 kPa (7 d)、约 390 kPa (14 d)、约 570 kPa (28 d)	质量损失量随循环次数的增加逐渐减少, 但强度随循环次数的增加有所上升; 干缩性系数随时间增大先增大后减小, 稳定在固定值
[28]	淤泥质黏土	36.40	24.60	聚丙烯纤维: 0.05%	水泥: 5% 石灰: 5%	UCS: 1.02 MPa (28 d), 为相同龄期掺量均为 8% 的纯石灰土和纯水泥土强度的 2.08 倍和 1.62 倍 UCS: 0.88 MPa (28 d), 为相同龄期掺量均为 8% 的纯石灰土和纯水泥土强度的 1.80 倍和 1.40 倍	水稳性得到改善
[29]	淤泥质土	34.10	19.80	聚丙烯酸脂乳液: 0.3% 苯丙乳液: 0.3% 吸水树脂: 0.1%	—	UCS: 333.2 kPa (28 d) UCS: 362.7 kPa (28 d) UCS: 331.1 kPa (28 d)	固化土浸水 1 d 后强度最高仅下降 70 kPa, 此后强度持续下降; 固化土强度随着干湿循环次数增加而略微下降 固化土浸水 1 d 后强度提高 30 kPa, 强度较原状土浸水后显著提高; 固化土强度随着干湿循环次数增加而略微下降 固化土浸水 1 d 后强度下降, 7 d 后强度高于原状土浸水 7 d 的强度; 固化土强度随着干湿循环次数增加而略微下降

### 2.3 生物酶类软土固化材料

生物酶类固化材料发展较晚, 20世纪80年代, 国外才开始了对生物酶固化土的实验研究, 而我国是1995年首次从美国引入生物酶类固化材料并应用到道路修建中<sup>[30]</sup>。国内外学者对此类材料开展的相关研究见表5。由表5可知, 单独使用生物酶类固化材料时, 固化土强度增加较多, 但生物酶固化土长期

浸水会发生崩解现象, 丧失原有强度导致使用寿命缩短。为改善这一缺陷, 有学者将其与无机固化材料如水泥、石灰等结合使用, 广泛应用于低等级公路建设中。生物酶类固化材料的力学性能主要体现为固化土的加州承载比和无侧限抗压强度, 研究内容主要集中在固化时间、固化材料掺量等因素对固化土力学性能的影响, 而对稳定性能的研究内容较少。

表5 生物酶类软土固化材料研究汇总

Table 5 Summary of research on bio-enzymatic soft soil stabilizers

参考文献	软土类型	$\omega_L/\%$	$\omega_P/\%$	固化材料掺量	外加材料掺量	强度变化	稳定性变化
[30]	滩涂淤泥	56.90	26.80	派酶: 水=1:3 000	水泥: 3%	UCS: 948.8 kPa (28 d), 增加30.08%; 28 d 劈裂强度: 增加30.49%	—
[31]	黏土	85.00	37.00	0.6 mL 地酶添加到4 kg 水中, 再与25 kg 干燥土壤混合	—	CBR: 增加38%	—
[32]	高岭土	71.00	37.40	泰然酶: 2%	—	UCS: 增加约78.49% (30 d); CBR: 增加了16.4%	—
[33]	黏土	32.80	19.70	泰然酶: 1/30 L/m <sup>3</sup>	石灰: 5%; 外加材料: 3%	UCS: 0.49 MPa (7 d)、1.43 MPa (14 d); CBR: 增加了156%	—
[34]	黏土	32.68	18.13	泰然酶: 0.33% E3 酶: 0.5%	水泥: 15%; 石灰: 6% 水泥: 15%; 石灰: 9%	1 d 后抗剪强度在正应力为100 kPa、200 kPa、300 kPa 时, 相应提升420.4%、355.3%、316.2%; $c$ 为187.8 kPa, $\varphi$ 为20.43° 1 d 后抗剪强度在正应力为100 kPa、200 kPa、300 kPa 时, 相应提升283.6%、285.9%、287.3%; $c$ 为106.1 kPa, $\varphi$ 为19.21°	—
[35]	软土	32.00	22.20	生物酶: 400 mL/m <sup>3</sup>	—	CBR: 增加96% (28 d); UCS: 增加30.4% (7 d); 剪切强度增加46.1%	渗透系数降低了42%
[36]	软土	23.55	15.06	泰然酶: 900 mL/m <sup>3</sup>	—	CBR: 增加131.49% (14 d)	—
[37]	淤泥	48.10	22.30	泰然酶: 6%	—	$c$ 增加了99.59%, $\varphi$ 未改变; 屈服应力增加70.03%; CBR: 增加333%; UCS: 增加28.1% (28 d)	—
[38]	海洋黏土	69.50	36.70	生物酶: 0.5%	—	UCS: 19.83 MPa (7 d), 提高20.4%; 养护3 d 后 $c$ 增加了5.8%, $\varphi$ 减少了6.3%; 压缩指数 $C_c$ 提高了17.9%; 回弹指数仍维持不变	—
[39]	淤泥质软土	47.00	24.00	泰然酶: 0.5%	水泥: 15%; 石灰: 9%	当正应力为100 kPa、200 kPa、300 kPa 时, 抗剪强度分别提升320.90%、286.38%、266.21%	—

### 2.4 离子类软土固化材料

笔者收集到的关于离子类固化材料固化软土的研究内容较少。该类材料主要用于固化淤泥土, 在路基、沟渠等领域应用广泛。现有研究成果总结如表 6 所示。

由表 6 可知, 对离子类固化材料的力学性能研究与有机类固化材料类似, 主要集中于固化土的无侧限抗压强度、抗剪强度、抗拉强度等方面, 耐久性能的研究主要集中于水稳定性和干湿循环特性。

表 6 离子类软土固化材料研究汇总  
Table 6 Summary of research on ionic soft soil stabilizers

参考文献	软土类型	$\omega_L/\%$	$\omega_p/\%$	固化材料掺量	外加材料掺量	强度变化	稳定性变化
[40]	淤泥	49.70	21.60	EN-1 : 水=1 : 150	—	压缩系数和压缩指数减小, 压缩模量增大	—
[41]	淤泥	48.30	20.50	ISS (浓度 50%): 20%	—	UCS: 0.409 MPa (7 d)	相对于水泥而言, ISS 固化土的抗干湿循环能力有所提升; 浸水 14 d 后固化淤泥仍有强度
[42]	黏土	47.80	24.50	ISS : 水=1 : 150	—	UCS: 增加 48%	—
[43]	淤泥质土	47.80	24.50	EN-1 : 水=1 : 150	—	压缩系数降低 22.6%	—
	淤泥	50.80	31.70	EN-1 : 水=1 : 50	—	无侧限抗压强度提高 41.3%	—
				SA: 0.02%	水泥: 5%	UCS: 2.58 MPa (7 d)	—
				HW: 0.02%	水泥: 5%	UCS: 2.78 MPa (7 d)	—
[44]	淤泥质土	37.50	21.00	YFS: 0.02%	水泥: 5%	UCS: 2.95 MPa (3 d)、3.58 MPa (7 d), 7 d 强度约为 90 d 强度的 80%	养护龄期越短, 浸水后强度降低越大, 标准养护 3 d、浸水 42 d 强度下降为 2.5 MPa
[45]	淤泥质土	48.67	30.50	离子固化材料: 0.02%	水泥: 6%	3 d、7 d、14 d、28 d 的无侧限抗压强度分别提高 5.6%、10.7%、30.4%、35.3%	—
[46]	黏土	38.55	20.57	ZL-2: 0.02%	水泥: 4%; 石灰: 4%; 玻璃纤维: 0.4%	7 d 无侧限抗压强度提升 11.33%, 28 d 无侧限抗压强度提升 20.39%; 7 d 劈裂强度增长 26.2%	固化土长时间浸水后抗压强度下降, 28 d 强度损失为 9%; 冻融循环后的强度损失率降低

### 3 讨 论

根据表 3~6, 可以发现加入软土固化材料之后, 土壤的强度和稳定性都会得到提升。由于无机类软土固化材料的使用范围最广, 且有机类软土固化材料、生物酶类软土固化材料、离子类软土固化材料均有结合无机类软土固化材料使用的背景, 所以为进一步总结不同种类软土固化材料的使用范围, 作者将表 4~6 中收集到的参考文献在塑性图

中进行统计, 见图 1。

由图 1 可知, 由于离 A 线较远或液限高于 80% 区域的相关研究很少, 使用 3 种固化材料的软土, 其塑性相关指标均在 A 线附近, 液限在 20%~80% 附近。其中, 有机类固化材料和生物酶类固化材料应用的软土范围较广, 可应用于低液限黏土、高液限黏土和高液限粉土。相比之下, 离子类固化材料的应用范围要窄一些, 主要用于固化低液限黏土和低液限粉土。

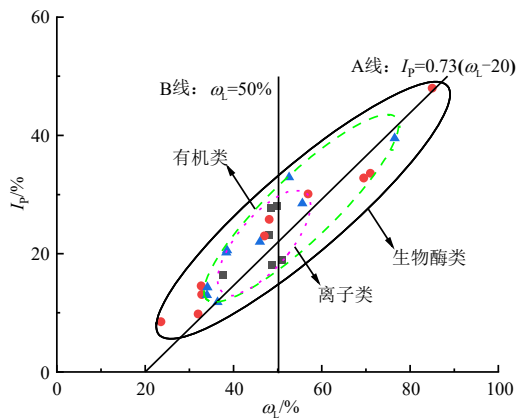


图1 软土固化材料应用范围

Fig. 1 Application range of soft soil stabilizers

## 4 结论

经过长期的科学研究和实际工程应用,使用软土固化材料对软土进行加固已被证实是一种有效的浅层处理技术。软土固化材料性能优越、绿色环保、节约社会资源的同时符合国家“十四五”发展战略,具有良好的应用前景。

通过前述对文献的研读和归纳,软土固化材料的起效机理和研究现状总结如下:

(1) 根据固化材料的化学成分和固化机理,可将其分为无机、有机、生物酶和离子4大类。

(2) 比较4类固化材料的优缺点可知:无机类固化材料强度稳定性好,可利用工业废渣做主固化材料,但工程用量大,运输成本高,早期强度低;有机类固化材料便于运输,施工方便,强度可控,但易受环境影响,老化趋势明显;生物酶类固化材料绿色环保,但是具有生物降解的特点,使用寿命较短;离子类固化材料的成本低,施工方便,易于运输,但固化过程易受环境影响,不适用于碱性土壤。

(3) 比较4类材料的固化效果可知:无机类固化材料适用范围较广,可以有效改善软土的强度和稳定性,而有机、生物酶和离子类固化材料一般要结合水泥或石灰等无机类固化材料才能更好地固化软土。

(4) 结合国内外学者的研究发现,研究主要集中在传统无机类软土固化材料,对其他种类的固化材料研究较少,且研究内容单一。因此,笔者认为,以下几个方面可作为后续研究的方向:

a) 建立统一的强度理论公式来预测固化土的强度,增强强度理论公式的普适性。

b) 增加宏观上系统性的工程力学行为的研究<sup>[47]</sup>,目前固化土的研究多进行单元体试验。

c) 进一步研发高效绿色的固化材料配比,保证工程适用性和环境友好型的同时,降低实际工程的成本<sup>[48]</sup>。

d) 扩大影响因素研究范围,如:补充恶劣条件下的力学性能研究。实际工程中,固化土养护过程中可能会遭到高温暴晒、雨水冲刷等恶劣天气影响,这些因素影响工程的安全性与固化土的使用寿命,因此有必要改进固化材料的配比,适应恶劣环境的影响。

## 参考文献

- [1] 李雪刚,徐日庆,王兴陈,等.杭州地区海、湖相软土的工程特性评价[J].浙江大学学报(工学版),2013,47(8):1346-1352,1360.  
LI Xuegang, XU Riqing, WANG Xingchen, et al. Assessment of engineering properties for marine and lacustrine soft soil in Hangzhou[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(8): 1346-1352, 1360.
- [2] 张凯,黄煜镔,王润泽,等.淤泥质软土固化理论研究和进展[J].路基工程,2012(6):1-6.  
ZHANG Kai, HUANG Yubin, WANG Runze, et al. Theoretical research and progress on solidification of silty soft soil[J]. Subgrade Engineering, 2012(6): 1-6.
- [3] 郭印.淤泥质土的固化及力学特性的研究[D].杭州:浙江大学,2007.  
GUO Yin. Study on stabilization of muddy soil and mechanical properties of stabilized soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [4] 马楠,杨艳静,王鑫珏.软土固化技术综述[J].中国水运,2021,21(5):137-138.  
MA Nan, YANG Yanjing, WANG Xinjue. Summary of soft soil solidification technology[J]. China Water Transport, 2021, 21(5): 137-138.
- [5] 刘强,邱敬贤,何曦.土壤固化剂的研究进展[J].再生资源与循环经济,2018,11(2):41-44.  
LIU Qiang, QIU Jingxian, HE Xi. Research progress of soil stabilizer[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2018, 11(2): 41-44.
- [6] 文嘉毅.工业废料固化淤泥质土研究[D].杭州:浙江大学,2019.  
WEN Jiayi. Study on solidifying sludge soil using industrial waste[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [7] 张信贵,欧鸥,易念平.土壤固化类材料及其应用[J].



- 工程设计与建设, 2004, 36(6): 8-11.
- ZHANG Xingui, OU Ou, YI Nianping. Soil solidification materials and their application[J]. *Engineering Design and Construction*, 2004, 36(6): 8-11.
- [8] 力乙鹏, 李婷. 土壤固化剂的固化机理与研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(增刊 2): 1273-1277, 1298.
- LI Yipeng, LI Ting. Stability mechanism and research progress of soil stabilizer[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(S2): 1273-1277, 1298.
- [9] 任皖遐, 夏艳波, 何振华, 等. 生物酶类土壤固化剂的固化机理及进展综述[J]. *价值工程*, 2020, 39(21): 248-249.
- REN Huanxia, XIA Yanbo, HE Zhenhua, et al. A summary of the solidification mechanism and progress of biological enzyme soil solidifying agents[J]. *Value Engineering*, 2020, 39(21): 248-249.
- [10] 卢雪松. 离子土壤固化剂加固武汉红色粘土的试验效果及其机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
- LU Xuesong. Research on the experimental effect and mechanism of Ionic Soil Stabilizer reinforcing Wuhan red clay[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [11] 耿轶君. EN-1 土壤固化剂改良红砂岩的作用机理与路用性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- GENG Yijun. Study on action mechanism and road performance of improved red sandstone by EN-1 soil agent[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [12] 罗莎. 固化剂改良土在堤防道路上的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- LUO Sha. Application study of improved soil by solidified agent in the embankment road[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [13] MA C, CHEN L Z, CHEN B. Analysis of strength development in soft clay stabilized with cement-based stabilizer[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 71: 354-362.
- [14] 徐日庆, 王旭, 文嘉毅, 等. 浅层淤泥质土固化剂[J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(7): 805-811.
- XU Riqing, WANG Xu, WEN Jiayi, et al. Curing agent for shallow mucky soil[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(7): 805-811.
- [15] 刘秀秀, 吴俊. 高含水率软土固化剂材料的性能研究[J]. *湖南文理学院学报(自然科学版)*, 2019, 31(1): 85-89, 94.
- LIU Xiuxiu, WU Jun. Study on the properties of curing agent material for soft soil with high water content[J]. *Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology)*, 2019, 31(1): 85-89, 94.
- [16] 徐日庆, 文嘉毅, 董梅. 工业废料固化浅层淤泥质土研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(5): 85-91.
- XU Riqing, WEN Jiayi, DONG Mei. Solidifying shallow sludge soil using industrial waste[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(5): 85-91.
- [17] 孙家瑛, 沈建生. 新型固化剂 GSC 固化软土的力学性能试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(1): 20-25.
- SUN Jiaying, SHEN Jiansheng. Experimental investigation of stabilized soft soil by new GSC[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(1): 20-25.
- [18] 徐日庆, 畅帅, 俞元洪, 等. 基于响应面法的杭州海相软土固化强度模型[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(11): 1941-1946.
- XU Riqing, CHANG Shuai, YU Yuanhong, et al. Model of strength developed with response surface methodology for solidified marine soft clay of Hangzhou[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(11): 1941-1946.
- [19] 王笑风, 杨博, 赵亚婷, 等. 固废基胶凝剂稳定土的路用性能[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2023, 47(2): 343-346, 351.
- WANG Xiaofeng, YANG Bo, ZHAO Yating, et al. Road performance of stabilized soil with solid waste based cementitious materials[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2023, 47(2): 343-346, 351.
- [20] 徐日庆, 朱坤垆, 黄伟, 等. 淤泥质土固化及路用性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(3): 167-174.
- XU Riqing, ZHU Kunlong, HUANG Wei, et al. Experimental study on solidification and road performance of mucky soil[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(3): 167-174.
- [21] 张振, 李光耀, 叶观宝, 等. GS 固化剂加固海底淤泥力学特性与微观机理[J]. *地基处理*, 2022, 4(增刊): 1-5.
- ZHANG Zhen, LI Guangyao, YE Guanbao, et al. Mechanical characteristics and microscopic mechanism of submarine silt stabilized by GS agent[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2022, 4(S): 1-5.
- [22] LIU J, SHI B, JIANG H T, et al. Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic

- polymer soil stabilizer[J]. *Engineering Geology*, 2011, 117(1-2): 114-120.
- [23] 王臻华. 复合固化剂固化淤泥路用性能及机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- WANG Zhenhua. Study on road performance and reinforcement mechanism of solidified sludge by composite stabilizer[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.
- [24] 陈军, 顾琳琳, 王振, 等. 新型高分子聚合物固化高含水率淤泥的早期强度试验研究[C]//中国地质学会. 2021年全国工程地质学术年会论文集. 北京: 科学出版社, 2021: 45-52.
- CHEN Jun, GU Linlin, WANG Zhen, et al. Experimental study on early strength of new polymer solidified high water content silty soil[C]//Geological Society of China. Proceedings of the 2021 National Academic Conference on Engineering Geology. Beijing: Science Press, 2021: 45-52.
- [25] SOLTANI-JIGHEH H, BAGHERI M, AMANI-GHADIM A R. Use of hydrophilic polymeric stabilizer to improve strength and durability of fine-grained soils[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 157: 187-195.
- [26] 李锋, 陈晶照. 高聚物稳定土的抗水性能影响因素分析[J]. *黑龙江交通科技*, 2022, 45(5): 41-43.
- LI Feng, CHEN Jingzhao. Analysis of influencing factors on water resistance of polymer stabilized soil[J]. *Communications Science and Technology Heilongjiang*, 2022, 45(5): 41-43.
- [27] 彭劼, 商志阳, 曹天赐, 等. 高分子吸水树脂对无机结合料固化土工程性质的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(1): 99-104, 166.
- PENG Jie, SHANG Zhiyang, CAO Tianci, et al. Effect of super absorbent polymer on engineering properties of soil solidified by inorganic binder[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(1): 99-104, 166.
- [28] 唐朝生, 施斌, 蔡奕, 等. 聚丙烯纤维加固软土的试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1796-1800.
- TANG Chaosheng, SHI Bin, CAI Yi, et al. Experimental study on polypropylene fiber improving soft soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1796-1800.
- [29] 任葳葳. 高分子材料改性淤泥质土及其机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- REN Weiwei. Study on modification and mechanism of silt solidified by polymer material[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [30] 黄泓翔. 生物酶固化土的加固机理及工程特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- HUANG Hongxiang. Study on reinforcement mechanism and engineering characteristics of bio-enzyme solidified soil[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [31] CHANDLER N, PALSON J, BURNS T. Capillary rise experiment to assess effectiveness of an enzyme soil stabilizer[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(10): 1509-1517.
- [32] YUSOFF S A N M, AZMI M, RAMLI H, et al. Laboratory investigation of TerraZyme as a soil stabilizer[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2017, 1892(1): 030014.
- [33] 解瑞松. 泰然(TerraZyme)土壤稳定酶的应用与改良技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006.
- XIE Ruisong. The research of application and reformation about TerraZyme[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2006.
- [34] 董辉, 程子华, 刘禹岐, 等. 生物酶改良淤泥质土的时效强度试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2): 84-94.
- DONG Hui, CHENG Zihua, LIU Yuqi, et al. Experimental study of aging strength of the mucky soils improved with bio-enzyme[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 84-94.
- [35] GANAPATHY G P, GOBINATH R, AKINWUMI I I, et al. Bio-enzymatic stabilization of a soil having poor engineering properties[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2017, 15: 401-409.
- [36] PANCHAL S, KHAN M M, SHARMA A. Stabilization of soil using bio-enzyme[J]. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2017, 8(1): 234-237.
- [37] 何振华. 生物酶改良淤泥的物理力学特性及工程应用[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- HE Zhenhua. Physical and mechanical properties and engineering application of biological enzyme to improve sludge[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020.
- [38] 戴北冰, 徐锴, 杨峻, 等. 基于生物酶的固土技术在香港的应用研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(6): 1735-1742.
- DAI Beibing, XU Kai, YANG Jun, et al. An investigation into application of bio-enzyme-based soil stabilization technology to Hong Kong[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1735-1742.
- [39] 叶学银, 李晓刚, 杨广, 等. 湖相淤泥质软土生物酶改性试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(4):

- 1032-1040.
- YE Xueyin, LI Xiaogang, YANG Guang, et al. Experimental study of bio-enzyme modifying lacustrine silty soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(4): 1032-1040.
- [40] 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.
- [41] 饶宇曦. 离子固化剂真空预压固化淤泥稳定性试验研究[D]. 湖北宜昌: 三峡大学, 2021.
- RAO Yuxi. Research on stability of silt solidified by vacuum preloading with ionic soil stabilizer[D]. Yichang, Hubei: China Three Gorges University, 2021.
- [42] WU X T, QI Y, CHEN B. Solidification effect and mechanism of ionic soil stabilizer applied on high-water-content clay[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 8583-8595.
- [43] 吴雪婷, 齐一, 吴迪, 等. EN-1型离子土固化剂固土效果对比研究[J]. 工程勘察, 2021(8): 1-7.
- WU Xueting, QI Yi, WU Di, et al. Comparative study on the effect of EN-1 ionic soil stabilizer on soil solidification[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2021(8): 1-7.
- [44] 陈明明, 黄伟, 邱鹏, 等. 离子型土壤固化剂固化土基层试验研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 97-103.
- CHEN Mingming, HUANG Wei, QIU Peng, et al. Experimental study on solidification of soil base with ionic soil solidification agent[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2021, 38(1): 97-103.
- [45] 董宝中, 陈永超. 离子固化淤泥土的强度特征与破坏模式[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2019, 39(4): 52-55.
- DONG Baozhong, CHEN Yongchao. Strength characteristics and failure patterns of ion-solidified silt soil[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 39(4): 52-55.
- [46] 白云硕. 纤维加筋复合固化土的路用性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- BAI Yunshuo. Research on the road performance of fiber reinforced composite cured soil[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [47] 沈飞, 曹净, 曹慧. 土壤固化剂的发展现状及其前景展望[J]. 岩土工程界, 2008, 11(12): 62-66.
- SHEN Fei, CAO Jing, CAO Hui. Development status and prospect of soil curing agent[J]. Geotechnical Engineering World, 2008, 11(12): 62-66.
- [48] 宋兵伟, 宫经伟, 邹平, 等. 土壤固化剂研究进展及其在温室修建中的应用前景[J]. 乡村科技, 2022, 13(3): 156-158.
- SONG Bingwei, GONG Jingwei, ZOU Ping, et al. Research progress of soil curing agent and its application prospect in greenhouse construction[J]. Rural Science and Technology, 2022, 13(3): 156-158.