

# Research Progress of Soil Stabilization and Its Application Prospect in Soft Soil Reinforcement

Xiuxiu Liu<sup>1</sup>, Meng Wu<sup>1</sup>, Jiequn Zhai<sup>2</sup>, Jun Wu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

<sup>2</sup>Rail Transit & Transportation, Tongji Architectural Design (Group) CO., LTD, Shanghai

Email: 2440269051@qq.com

Received: May 7<sup>th</sup>, 2017; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2017; published: May 27<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Soil stabilization is a new type of engineering materials with the character of high efficiency, low consumption and energy saving. The soft soil has the properties of loose, high natural water content, poor water permeability and high compressibility. When the construction is carried out on the soft soil ground, the uneven settlement may occur due to the insufficient bearing capacity of soft soil foundation. Therefore, soil stabilization is an effective method to reinforce the soft soil foundation, and then the bearing capacity of the foundation can be increased. In this paper, the definition, classification and mechanism of the soil stabilization were firstly introduced. Then, the research progress and scope of application of soil stabilization were given in details. After that, the application of soil stabilization and related research results in soft soil foundation treatment were further introduced and discussed. Finally, some drawbacks existing in the research of soft soil stabilization were analyzed, and future research was given.

## Keywords

Soil Stabilization, Curing Mechanism, Soft Soil Foundation, Classification

---

# 土壤固化剂研究现状及其在软土加固中的应用前景

刘秀秀<sup>1</sup>, 吴 朦<sup>1</sup>, 翟杰群<sup>2</sup>, 吴 俊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海

<sup>2</sup>同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司轨道交通建筑设计院, 上海

Email: 2440269051@qq.com

收稿日期：2017年5月7日；录用日期：2017年5月22日；发布日期：2017年5月27日

## 摘要

土壤固化剂具有高效、低耗和节约能源的优点，是一种新型工程材料。而软土具有土质疏松、天然含水量高、透水性差、压缩性高等不良特性，在软土地基上进行工程施工时，往往会造成地基承载力不足、不均匀沉降等问题，故采用土壤固化剂对软土地基进行加固处理是一种有效的手段，具有广阔的应用前景。本文首先介绍了土壤固化剂的定义、分类和作用机理；然后介绍了土壤固化剂的国内外研究现状及适用范围；重点阐述了土壤固化剂在软土地基处理方面的应用以及相关研究成果；最后分析了当前软土固化剂研究中存在的问题，并针对软土地基采用固化剂时进一步研究方向。

## 关键词

土壤固化剂，固化机理，软土地基，分类

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

二十世纪六十年代以来，土壤固化剂作为一种新型的工程材料，具有比水泥更好的经济效益及环保特性，在实际工程中被大量使用。采用土壤固化剂既可以充分利用土地资源，替代石灰、水泥等传统材料，节省资源，保护生态环境；同时它还能解决水泥、粉煤灰、石灰等材料在土壤加固时难以解决的一些问题，如水泥干缩性差、石灰早期强度形成缓慢、粉煤灰水稳性差等。鉴于土壤固化剂具有独特的固化效果，已经被广泛应用于道路基层、复合地基处理、渠道防渗、水利护坡等工程建设当中[1][2]。

我国软土分布广泛，随着城市化进程的加快，经常需要在软土地基上进行工业与民用建筑建造、道路施工和基坑开挖等。软土大都具有土质疏松、天然含水量高、透水性差、压缩性高等特性。这些天然不利特性会使地基承载力不足，从而造成地基的沉降或变形。地基的沉降或变形会使结构物出现裂缝、倾斜、倒塌等，造成工程结构使用功效降低甚至失效。为保证工程质量，需要对软土地基进行预先加固。而土壤固化剂能与软土发生一系列的物理化学反应，能将碎散的土壤颗粒固结为具有一定强度的整体性物质，进而提高软土强度[2]。因此在软土中采用合适的土壤固化剂对土体进行改良是非常有效而且必要的。然而，现阶段土壤固化剂的使用较为混乱，各种固化剂的作用机理和使用范围并不明确，有必要对其进行总结和归纳，使其能更好地指导实际工程。本文首先对土壤固化剂的相关概念、分类、固化机理，及国内外的研究现状进行介绍，而后对土壤固化剂在软土地基处理中的应用进行详细阐述，最后针对在软土中采用土壤固化剂存在的问题进行分析并讨论未来的发展方向。

## 2. 土壤固化剂的相关性质

### 2.1. 土壤固化剂的概念

土壤固化剂是由多种无机和有机材料合成的一种新型环保节能工程材料。在土壤中加入固化剂后，

固化剂与土颗粒充分混合，发生一系列的物理化学反应，从而改善土颗粒之间的接触面、填充颗粒间孔隙，并产生新物质凝聚土壤颗粒来强化土颗粒之间的连接结构。固化后的土体在外部挤压力作用下，可进一步缩小土颗粒间距，密实土壤结构，进而使土体强度提高，孔隙比变小，压实度变大，最终能够满足工程性质的要求[1] [3]。

## 2.2. 土壤固化剂的分类及作用机理

按照土壤固化剂的发展过程、化学成分及固化机理等[4]，可对其进行分类，见图 1 所示。本文主要讨论固化剂组成成分相关性质对土壤性能的影响，因此按照主要成分的分类方法对土壤固化剂进行介绍。

### 2.2.1. 无机化合物类土壤固化剂

无机化合物类土壤固化剂多为粉末状，包含主固化剂和助固化剂两种成分。常见主固化剂有石灰、粉煤灰、水泥、矿渣等，各类酸类、硫酸盐、其他无机盐和表面活性剂等材料是助固化剂[4]。

无机化合物类土壤固化剂的作用机理的分类见图 2 所示，主要可归纳为土壤固化剂与土壤内的水、土颗粒的反应。

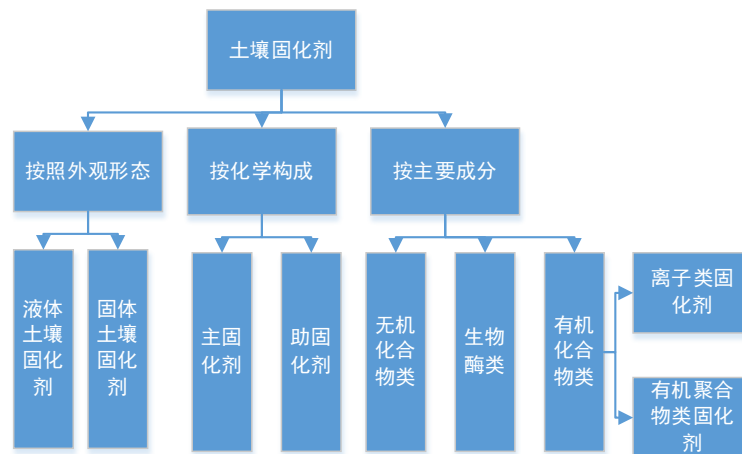


Figure 1. Classification of soil stabilization  
图 1. 土壤固化剂的分类

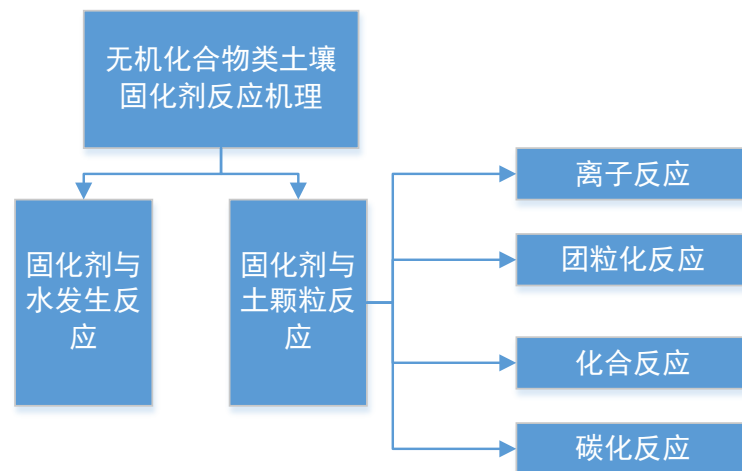
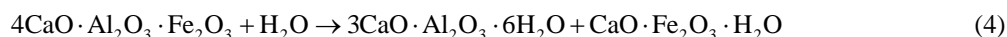
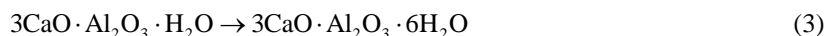
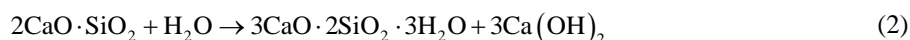
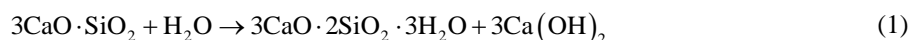


Figure 2. Curing mechanism of inorganic compound soil stabilization  
图 2. 无机化合物类土壤固化剂的反应机理

其中固化剂与水主要发生水解、水化反应，方程式如下：



由上述化学反应式可以看出，采用无机化合物类土壤固化剂时主要生成水化硅酸钙(又称 CSH 凝胶，方程式(1、2))，对改良土的抗压强度起主要作用；铝酸三钙(方程式(3))水解快，对早期强度起作用；铁酸一钙(方程式(4))对后期强度起作用。

上述的胶凝水化物(CSH 凝胶、铝酸三钙、铁酸一钙等)既能自行硬化形成土骨架[4]，也能与土颗粒内的活性矿物质发生反应，即水化产物中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  与胶凝粒子的扩散层中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  进行离子交换，使双电层的厚度减薄，土颗粒间结合力增强；胶凝粒子强烈的表面能促进土颗粒的粘结；水化产物中的  $\text{Ca}^{2+}$  等与粘土矿物中的酸性氧化物反应，生成不溶于水的晶体，填充孔隙，并与土颗粒粘结形成土骨架；氢氧化钙与  $\text{CO}_2$  发生硬化反应。这一系列物理化学反应，强化土颗粒间的结构连结，改善土颗粒之间表面接触的本质，进而达到从根本上固化土的目的。

### 2.2.2. 有机化合物类固化剂

有机化合物类土壤固化剂多为液体状，主要有通过石油磺化而得到离子类固化剂，还有由改性水玻璃类、环氧树脂类、高分子材料类及表面活性剂等组成的有机聚合物类固化剂[4] [5]。有机化合物类固化剂的固化剂机理见表 1 所示。

见表 1 可知，有机化合物类土壤固化剂主要通过离子交换、化学键作用、高分子链接等，使土颗粒更加紧密，同时减小水对土颗粒在吸附作用。

### 2.2.3. 生物酶类固化剂

生物酶类土壤固化剂为液体状，是由有机质发酵而成的多酶基产品。生物酶类土壤固化剂按照一定比例制成水溶液，然后洒入到土壤中，酶的催化作用能加快反应速度，促进粘土矿物离子的交换反应、水解和水化、凝聚反应等，而固化酶溶液的比表面积很大，能够吸附小颗粒土，最终改变了土壤的原有结构，使土壤形成致密的板状结构，在外力碾压下，土壤的抗压强度、抗渗能力增大[6]。

### 2.2.4. 各类土壤固化剂的比较

由于各类土壤固化剂具有不同组成成分，土壤固化剂的反应机理不同，造成各类固化剂具有不同的

Table 1. Curing mechanism of organic compound soil stabilization

表 1. 有机化合物类土壤固化剂的作用机理

分类	固化机理
离子固化剂	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 离子固化剂被水稀释放离子，置换出土颗粒表面的亲水性阳离子，使吸附能力减弱，土壤颗粒表面吸附的薄膜水变成自由水，经外部压力碾压易排出；</li> <li>2. 离子固化剂强电荷及氢键与土粒表面发生吸附，使疏水基团向外，将土颗粒表面的双层水排开，使土壤永久地由“亲水性”变成“憎水性”，从而使土颗粒密实。</li> </ol>
有机聚合物类 固化剂	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 有机聚合物类固化剂能将土壤中的矿物质和土壤的分子分解，使土颗粒重新结晶；</li> <li>2. 有机高聚物分子将相邻土颗粒通过高分子链接，在电性引力作用下，各高分子链互相交叉缠绕，形成整体，土颗粒更加密实；</li> <li>3. 形成的高分子链是不溶于水的，土颗粒被疏水性物质包围，改善了水对土颗粒的影响，增加了土的密实度。</li> </ol>

特点和使用范围,在实际工程中要恰当的选择,发挥其最大的功能。见表 2 对各类固化剂进行了总结。

见表 2 可以看出,各类固化剂都有各自的特点,在实际工程中要恰当使用,充分发挥各自的性能。无机化合物类土壤固化剂的使用范围较广,有机类土壤固化剂适用于含水率较低的土壤,生物酶类固化剂由于价格昂贵且受环境影响较大适用于比较极端的条件下。

### 3. 国内外研究现状

针对上述的分类,国内外对土壤固化剂进行不同程度的研究。其中,无机化合物类和有机化合物类土壤固化剂研究较为深入和成熟,而由于生物酶受环境影响较大,不易控制,生物酶类固化剂在国内外的研究尚处于初步阶段。

#### 1) 无机化合物类土壤固化剂

国内外研究者通过充分利用工业废弃物、碱性活化物等无机化合物,部分或完全替代水泥对土壤进行固化,并分析固化土的性能。其中,黄新等[7]首先提出固化土的结构形成模型,并提出控制胶结性水化物与膨胀性水化物生成速率的协调性来影响固化土的抗压强度,进而提出采用工业废渣制备固化剂-CG 固化剂,其强度比水泥基固化剂有大幅度提高; Sulapha Peethamparan、Shahram Pourakbar 和 LiChen 等[5] [8] [9] 分别采用高氧化钙含量的水泥窑粉尘(CKD)、棕榈油燃料灰(POFA)和焚烧的污泥灰(ISSA)等工业废弃物作为新型固化剂,完全替代或部分替代水泥进行土壤固化,发现新型固化剂与土颗粒发生水化反应能生成大量的钙矾石和 CSH 等,提高土壤的抗压强度,降低固化土的可塑性指数,使用这些工业废弃物来固化土壤是可行的。陈洁、杨有海等[10] [11]研究了使用水泥、生石灰和粉煤灰在固化土壤过程中,固化剂的掺量、土样含水、期龄和搅拌均匀程度对改良土特性的影响,发现水泥掺比对土壤后期固化强度起主要作用,龄期对低含水率的土样影响较大,搅拌均匀程度是影响固化土壤的关键因素,对实际工程有重要的指导意义。Nuno Cristelo 等[12]探究碱性活化剂对与粉煤灰固化土壤的影响,发现降低活化剂与粉煤灰的比率有利于土壤强度的增加,后期提高强度的效果更加明显。

#### 2) 有机化合物类土壤固化剂

研究者主要利用高分子化合物、离子化合物等材料,单独掺入土壤中或与水泥等材料混合使用,进行固化土壤,分析有机化合物与土壤的作用机理,检验固化土的性能。其中,Simon T. Gilazghi 等[13]探讨使用液体聚合物(MDI)固化高塑性土壤,对无侧限抗压强度和自由膨胀率的影响,结果表明在 0%~13% 聚合物用量下,土壤的抗压强度随掺量的增加呈现线性增加,自由膨胀率逐渐减小,浸水后的聚合物固化强度虽然降低,但仍旧含有残余强度;刘清秉、楼蓉蓉等[14] [15] 探究了 ISS 离子固化剂对膨胀土的固化效果,发现 ISS 的最佳配比为 1:200 时,土壤的抗剪强度达到最大,并通过标准吸湿含水率试验、

Table 2. Comparison of the three types of soil stabilization

表 2. 三类土壤固化剂的比较

分类	优点	缺点	使用寿命	代表产品
无机类	原料易得、施简单,工程造低; 改良土的性能稳定持久	掺入量大; 早期强度低	30~50 年	Aught-Set、 QJ 固化剂等
有机类	绿色、无公害; 掺入量少,不需专门的施工设备,节省工程投资和维护成本;能确保早期强度和改良土保持长期稳定	抗水性能差; 易受环境影响	30 年	ISS、 高分子有机土壤固化剂 (WSP)等
生物酶类	绿色、无污染; 可增加土壤密度,降低土壤膨胀系数,耐久性好	受温度、PH 值等环境因素 影响大; 成本高,	8 年	帕尔玛土壤固化剂等



扫描电镜(SEM)等系列试验观察改良土的微观结构,发现土样吸湿持水能力下降,土样的基本成分没有发生太大变化,他们认为ISS与土样作用不是发生化学反应,而是通过离子吸附等复杂表面物化反应进行的。耿秩君[16]采用EN-1土壤固化剂和水泥对红砂岩进行改良,发现掺入0.014%固化剂的28天抗压强度是掺入4%水泥的71%,固化效果显著,同时三轴压缩和直剪试验结果表明改良土的抗剪强度增大明显,压缩性明显降低,并采用有限单元法对改良土作用下的基层路面结构进行三维数值模拟分析,发现该固化剂是可行的。

### 3)生物酶类土壤固化剂

研究者探究使用生物酶固化土壤的作用效果,研究影响固化土性能的因素。其中,Ihan Chang等[17]探讨了使用生物聚合物—市售的 $\beta$ -1,3/1,6-葡聚糖聚合物产品来提高残积土的强度,发现聚合物颗粒的表面吸附力和张力是提高土壤抗压强度的关键因素,在60℃的固化温度下抗压强度达到最佳,Animesh Sharma等[18]使用巴氏芽孢杆菌(*Bacillus pasteurii*)固化土壤,发现土壤的抗压强度增大1.5~2.9倍,而巴氏细菌浓度、固化剂浓度以及龄期是影响抗压强度的关键,由于细菌溶液成本低且环保,可大量制备该固化剂,并应用于工程实际;张心平等[19]通过派酶固化剂与石灰、水泥等传统固化材料对提高土壤的无侧限抗压强度进行试验研究,发现派酶在第60天的强度均高于其他固化材料;李威[20]探究使用泰然酶固化剂对红粘土进行改良,试验研究表明使用泰然酶固化土的无侧限抗压强度比未使用的提高2-3倍,其加州承比(CBR)能提高40%左右。

综上所述,国内外在无机化合物类和有机化合物类固化剂方面取得很大的成果,而在生物酶类固化剂的研究与开发上明显不足,需要进一步深入探索,扩大绿色固化剂的使用范围,使其成为未来的发展趋势,构建生态友好型社会。

## 4. 土壤固化剂在软土地基方面的研究

软土的含水量高、强度低、灵敏度高,而由软土组成的地基具有承载力低、较易沉降和差异沉降较大、沉降历时长等特点[21],因此软土地基不能承受较大荷载,否则会因强度较低造成剪切破坏而产生较大沉降。由于软土问题造成工程建设困难、维修成本高等问题日益突出,对软土地基进行处理是极其重要的。

软土地基处理有许多方法,如换土法、挤压法、排水固结、化学加固法等。其中换土法处理软土层厚度在0.5-3m范围内;挤压法需要大量碎石、砂等,尽管能够提高土壤的承载力,但不利于节约资源和生态保护;排水固结法仅适用于饱和软土,而且所需工期较长。以上三种方法就充分利用土壤资源、改良土壤自身性能方面明显不如化学加固法。化学加固法是指利用水泥浆液、黏土浆液或其他化学浆液,通过灌注压入、高压喷射和机械搅拌,使浆液与土颗粒胶结起来,以改善地基土的物理力学性质的地基处理的方法[21]。而采用土壤固化剂对软土地基进行处理就是一种化学加固法。因此,开发针对软土地质的固化剂新材料是世界各国工程技术人员的一个方向和课题。

### 4.1. 试验研究

试验研究主要是通过室内试验,再结合现场试验等宏观与微观相结合探究不同固化剂在软土地基处理中的固化性能,以及探究影响固化性能的主要因素。需要注意的是,传统固化剂材料由于采用大量的水泥,对环境影响较大,且由于国内建材价格快速上涨等原因使传统加固剂造价较高,故现阶段广大学者都致力于研发可以降低施工成本,且具有绿色环保的新型固化剂。其中,针对新型固化材料的研究主要有以下几个方面:

#### 1)工业废弃物等在软土固化地基处理中的应用研究

Aly Ahmed [22]通过将工业废石膏分别加入到水泥固化土和石灰固化土中,发现增大石膏掺量的比例对水泥固化土的抗压强度的提高不利,但对石灰固化土影响几乎没有,由于石膏较低的成本,因此可以应用于软土路基加固中;方祥位等[23]以干排粉煤灰和脱硫石膏两种工业废料为主原料,对北京软土进行固化研究,结果表明该固化剂改良土的工程特性明显优于石灰改良土,该固化剂改良后的土壤最大干密度增大、抗剪强度变高、防水渗透性好,因此可以提高底基层和基层的整体性,有利于避免公路路面产生裂缝;李战国等[24]认为工业废渣能提供膨胀性水化物填充土颗粒间的孔隙,也含有一定碱度,在加固软土方面有其独特的优势,通过试验发现在水泥用量仅占固化剂总量的 24%时,其固化土的抗压强度是水泥固化土的 2.75 倍,该固化剂使废渣转变成“资源”。朱向阳、赵梦凝等[25] [26]分别探究了在水泥土搅拌桩中使用矿渣水泥和石膏、在粉喷桩中使用高钙粉煤灰等部分替代水泥进行地基加固中的应用,通过室内试验找到最佳配比,经过推算现场水泥土加固的强度及其变化规律、室内模拟施工等方法,朱向阳得出水泥掺量不得低于 70 kg/m,才能满足工程要求的结论,赵梦凝确定高钙粉煤灰掺量 15%、水泥掺量 5%时,能够满足工程要求。工业废弃物与软土主要发生 2.2.1 所列出的化学反应,生成的 CSH 等胶凝性物质,使土颗粒更加致密,减小水对土颗粒的影响,使固化土的强度提高,抗剪能力增大。

### 2) 碱性活化剂等外掺剂在软土固化地基处理中的应用研究

Chayakrit Phetchuay、易耀林、邢维忠等[27] [28] [29]分别研究了碱性活化剂对 CCR(电石渣)、FA(粉煤灰)和 GGBS(高炉矿渣)等固化软粘土的影响,发现添加活化剂能破坏矿渣等物质内部的稳定结构,将内部具有水化性质的物质释放出来,加快反应的进行,从而显著地提高固化土的抗压强度,Chayakrit 还讨论了活化剂所占比例对抗压强度的影响,并提出归一化方程来确定 28 天内的无侧限抗压强度值。邓永锋等[30]研究添加偏高岭土(MK)对水泥固化土的影响,提出固化土抗压强度与 MK 掺量之间关系是由活性域和惰性区域组成, MK 掺量为 3%是其分界点,并通过 SEM 和压汞试验,探究了固化土微观结构的变化,发现 MK 的掺入是从孔隙密实和胶结物增加这两方面提升水泥土的力学性能的,进而建立了孔隙比和水泥掺入比两参数的强度预测模型,指导工程实际。碱性活化剂等外掺剂能激发物质内部活性物质的活性,提高土壤的 PH 值,促进水化等反应,同时能与 CSH 等物质发生类似方程式 5 的反应,生成钙矾石等物质,形成的网络结构能提高固化土的强度。



### 3) 有机化合物类固化剂在地基处理中的应用研究

王广政等[31]采用离子固化剂 CHF 固化粘性土壤,探讨在不同剂量的石灰和养护时间下的改良效果,发现 CHF 的固化性能与龄期成正比,同时在石灰掺量较少的情况下即可满足地基加固的承载力要求。任葳葳[32]采用聚丙烯酸酯乳液、苯丙乳液、吸水树脂三种高分子材料对淤泥土进行固化,发现掺加高分子材料后,固化土的抗压、抗剪强度增加,而且固化土还具有了一定的保水性,土壤的缩限有显著地提高,并根据干湿循环测试、泡水试验等探究了该固化剂应用于边坡工程、软基填筑材料是可行性的。通过电镜扫描等发现有机化合物与土壤作用时,能打破土颗粒的排列,使土颗粒联结更加致密,从而提高固化土的强度、抗变形能力等;通过 CT 扫描探究固化土的孔隙变化,发现有机化合物类固化剂作用下的固化土的大孔隙减少,小孔隙增加,优化了孔隙结构和排列,进而改善软土的强度。

另一方面,针对影响固化性能因素的研究有:涂帆等[33]发现粉喷桩和浆喷桩的抗压强度都与水泥掺量成线性关系,但掺量对粉喷桩后期影响较大,而粉喷桩适用于含水量较大的地区,还根据第 3、7 天的抗压强度,建立经验公式,拟合浆喷桩的 28 天水泥土的抗压强度。宁建国等[34] [35]探究了土壤 PH、土壤矿物成分对固化土抗压强度的影响,发现土壤中的蒙脱石含量高会降低抗压强度,需要加入碱性物质,提高抗压强度,土样 PH 值增大,固化土的抗压强度随之提高,当  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  达到饱和时,增大 PH,

抗压强度基本恒定；王领等[36]重点探究了水泥加固土初期 PH 值变化与强度的关系，发现初期 PH 大于 11.7 时，28 天上海粘土的抗压强度才能满足要求。

## 4.2. 理论研究

软土固化剂对地基加固的理论研究，主要是利用影响固化土性能的因素如水泥掺量、固化龄期、含水率等作为参数，通过数值分析、构建数学模型等方法预测固化土的抗压强度等。

Lorenzo 等[37]提出用固化后的孔隙率( $e_{or}$ )和水泥掺量( $A_w$ )的比值来表征水泥固化软粘土的强度和压缩性，其中通过应力-应变行为看出当  $e_{or}/A_w$  比增加时，水泥固化土的应变软化得到改善；李雪刚、徐日庆等[38] [39]采用水泥、生石膏和几种外加剂固化含有机物腐植酸的软土，并通过响应面法优化软土复合固化剂配方，发现添加改良土的 28 天强度在 740~891 kPa 变化，强度值能满足工程要求，并通过建立固化土综合强度预测模型与固化土弹塑性损伤模型，分析有机质含量、固化剂掺量和水泥掺量之间的变化规律；王立峰等[40]探究纳米硅粉  $SiO_{2-x}$  作为水泥土外掺剂对固化土的影响，并使用正交分析与回归分析，得出水泥掺量显著影响抗压强度、围压和纳米硅掺量其次影响抗压强度的结论，进而根据最佳配比建立回归方程预测抗压强度；Zhang 等[41]提出用固化后的孔隙率、水泥掺量以及养护龄期作为控制参数，使用函数表达式 6 对固化土的无侧限抗压强度进行表征，其中  $q_u$  表示无侧限抗压强度(UCS)， $n_t$  表示固化后的孔隙率， $a_w$  表示水泥掺量， $T$  表示固化时间， $C$ 、 $D$  为无量纲常数。

$$q_u = C \left( \frac{n_t}{a_w \sqrt{T}} \right)^{-D} \quad (6)$$

综上所述，使用土壤固化剂处理软土地基，能通过一系列的物理化学反应改良土壤的物理性能和力学性能，使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的物质或固结柱体，与天然地基形成复合地基，共同承担荷载。而且应用工业废渣能使废渣变宝，应用有机物和生物酶类物质有利于环保，可见土壤固化剂对于处理软土地基的应用前景非常广泛。再通过不同影响参数构建本构关系、数学模型等可以更好地指导工程实际。

## 5. 土壤固化剂的研究展望

### 5.1. 存在的不足

虽然国内的土壤固化剂种类繁多，有关固化剂介绍和应用的文献不少，但通过文献查阅发现针对软土固化问题，大都围绕室内试验数据，测定软土的物理参数，分析各参数与力学指标之间的相关关系等，但仍存在不足。

(1) 室内试验可以保证改良土的试样的质量，而在实际工程中由于施工的质量受多方面原因制约而降低，同时室内试验中加固土的搅拌方式和养护方式与现场施工存在较大差异，使室内试验不能很好地指导工程实际。

(2) 缺少系统规范的指导使用方法，造成固化剂材料多，但工程应用少；

(3) 试验多集中于单轴、三轴的强度分析，但涉及弹塑性本构关系、强度破坏下的相应的破坏包络线等研究较少，很少能提出简单的经验公式指导实际工程。

(4) 研究固化剂掺量、龄期对抗压、抗拉、抗剪强度的影响的论文较多，很少涉及固化剂密度、土壤含水率、固化温度、养护时间、土样 PH 值等多重因素对固化土的微观结构和强度的影响。

(5) 对固化剂的观测时间大都 90~180 天，缺少其长期效果的跟踪反馈。

(6) 添加剂配方的优选大都采用正交试验，不能得出各添加剂彼此间的相互作用规律。



## 5.2. 软土固化剂研究方向

土壤固化剂的广泛使用具有明显的社会、经济、环保价值。而土壤固化剂在固化软土的研究上,要综合考虑包括固化效果、适用性、施工方式、成本、环境等诸多因素,还要考虑建设施工本身的要求。笔者认为软土固化剂的研究有以下几个方向:

- (1) 充分利用工业废弃物及其副产品等来研制、开发新型、有效的固化剂,使工业废渣在加固软土地基方面发挥更大的作用。
- (2) 深入研究有机高分子、生物酶类固化剂,结合宏观与微观分析,进一步挖掘其作用机理,扩大其在地基加固处理中的使用范围。
- (3) 探究综合使用各类固化剂,扬长避短后的作用效果。
- (4) 进一步改进固化剂的配方或施工工艺,提高固化土的力学、抗变形、耐久性能。
- (5) 深入探究固化剂改良软土三轴特性,并能建立本构关系反映固化剂改良土的特性,找到合适的经验公式或数学模型,建立理论与实践的桥梁,使经验公式更好的指导工程实际。
- (6) 研究在动力载荷作用下固化剂改良土的性能和本构关系。

## 基金项目

本论文得到教育部留学归国基金(E262021514)和上海工程技术大学大学生创新项目(E308001602123)的支持,在此表示感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] 顾昕. 新型无熟料碱渣固化剂研制及其固化土力学性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2014.
- [2] 郭晓琼. TG 土质固化剂固化土基层应用研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2014.
- [3] 张登良. 加固土原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [4] 李学德. 双灰固化土本构关系及冻融损伤模型研究[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [5] Peethamparan, S., Olek, J., Lovell, J., *et al.* (2008) Influence of Chemical and Physical Characteristics of Cement Kiln Dusts (CKDs) on Their Hydration Behavior and Potential Suitability for Soil Stabilization. *Cement and Concrete Research*, **38**, 803-815.
- [6] 丁毅. 土壤固化及其应用: 筑路材料与技术的变革[M]. 北京: 中国大地出版社, 2009.
- [7] 黄新, 胡同安. 水泥废石膏加固软土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 72.
- [8] Pourakbar, S., Asadi, A., Huat, B.B.K., Fasihnikoutalab, M.H., *et al.* (2015) Stabilization of Clayey Soil Using Ultra-fine Palm Oil Fuel Ash (POFA) and Cement. *Transportation Geotechnics*, **3**, 24-35.
- [9] Li, C., Lin, D.-F., *et al.* (2009) Stabilization Treatment of Soft Subgrade Soil by Sewage Sludge Ash and Cement. *Journal of Hazardous Materials*, **162**, 321-327.
- [10] 陈洁. 吹填土固化结构强度的再形成试验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
- [11] 杨有海, 刘永河, 任新, 等. 水泥搅拌饱和黄土强度影响因素试验研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 1(33): 21-25, 64.
- [12] Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., Pinto, A.T., *et al.* (2013) Effects of Alkaline-Activated Fly Ash and Portland Cement on Soft Soil Stabilisation. *Acta Geotechnica*, **8**, 395-405. <https://doi.org/10.1007/s11440-012-0200-9>
- [13] Gilazghi, S.T., Huang, J., Rezaeimalek, S., Bin-Shafique, S., *et al.* (2016) Stabilizing Sulfate-Rich High Plasticity Clay with Moisture Activated Polymerization. *Engineering Geology*, **211**, 171-178.
- [14] 刘清秉, 项伟, 崔德山, 曹李靖, 等. 离子土固化剂改良膨胀土的机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 4: 648-654.
- [15] 楼蓉蓉, 刘顺昌, 等. ISS 离子固化剂改性膨胀土试验研究[J]. 江西建材, 2016, 20: 212.
- [16] 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]: [硕士学位论文]. 成都市: 西南交通大学, 2009.
- [17] Chang, I., Cho, G., *et al.* (2012) Strengthening of Korean Residual Soil with  $\beta$ -1,3/1,6-Glucan Biopolymer. *Construc-*

*tion and Building Materials*, **30**, 30-35.

- [18] Animesh, S., Ramkrishnan, R., *et al.* (2016) Study on Effect of Microbial Induced Calcite Precipitates on Strength of Fine Grained Soils. *Perspectives in Science*, **8**, 198-202.
- [19] 张心平, 苏海涛, 彭红涛, 等. 派酶固化土壤的无侧限强度的试验研究[J]. 公路, 2008(6): 171-172.
- [20] 李威. 泰然酶固化剂固化土壤的试验研究[J]. 湖南交通科技, 2016, 42(2): 81-85.
- [21] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [22] Ahmed, A. (2015) Compressive Strength and Microstructure of Soft Clay Soil Stabilized with Recycled Bassanite. *Applied Clay Science*, **104**, 27-35.
- [23] 方祥位, 孙树国, 等. GT 型土壤固化剂改良土的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 9: 1545-1548.
- [24] 李战国, 赵永生, 黄新, 等. 工业废渣制备软土地基固化剂设计方法探讨[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 4: 497-500.
- [25] 朱向阳. 水泥土搅拌桩处置连云港软土地基的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京市: 河海大学, 2007.
- [26] 赵梦凝. 高钙粉煤灰粉喷桩在软土地基加固的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [27] Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., Udomchai, A., *et al.* (2016) Development in Soft Marine Clay Stabilized by Fly Ash and Calcium Carbide Residue Based Geopolymer. *Applied Clay Science*, **127-128**, 134-142.
- [28] 易耀林, 李晨, 等. 碱激发矿粉固化连云港软土试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1820-1826.
- [29] 邢维忠. GGB 固化合肥湖积软土的力学特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 安徽: 安徽建筑大学, 2015.
- [30] 邓永锋, 吴子龙, 刘松玉, 等. 地质聚合物对水泥固化土强度的影响及其机理分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 3: 446-453.
- [31] 王广政, 马青娜, 刘亚文, 等. CHF 固化剂在软土地基加固中的试验研究[J]. 山西建筑, 2016, 27: 72-73.
- [32] 任葳葳. 高分子材料改性淤泥质土及其机理研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [33] 涂帆, 常方强, 等. 水泥土无侧限抗压强度影响因素的室内试验研究[J]. 工程勘察, 2005, 3: 8-10.
- [34] 宁建国, 黄新. 土样矿物成分对固化土抗压强度增长的影响[J]. 岩土力学, 2010, 1: 113-117.
- [35] 宁建国, 黄新, 许晟, 等. 土样 pH 值对固化土抗压强度增长的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 1: 98-102.
- [36] 王领. 上海黏性土与水泥混合后强度增长特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 3: 743-747.
- [37] Lorenzo, G.A., Bergado, D.T., *et al.* (2006) Fundamental Characteristics of Cement-Admixed Clay in Deep Mixing. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **18**, 161-174. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:2\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(161))
- [38] 李雪刚. 杭州海相软土的固化及其理论研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [39] 徐日庆, 李俊虎, 蔡承晟, 李雪刚, 荣雪宁, 畅帅, 等. 用固化剂 GX08 加固杭州海湖相软土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2014, 6: 1528-1533 + 1554.
- [40] 王立峰, 翟惠云, 等. 纳米硅水泥土抗压强度的正交试验和多元线性回归分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32: 452-457.
- [41] Zhang, D.W., Chen, L., Liu, S.Y., *et al.* (2012) Key Parameters Controlling Electrical Resistivity and Strength of Cement Treated Soils. *Journal of Central South University*, **19**, 2991-2998. <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1368-8>

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)