

# 渣土改良剂对砂土渗透性的改良机制

支 斌, 李树忱, 段 壮

山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南  
Email: zhibinzy111@163.com

收稿日期: 2020年11月17日; 录用日期: 2020年12月2日; 发布日期: 2020年12月22日

## 摘 要

砂土地层属于典型的力学不稳定地层, 其高渗透性带来的喷涌问题是盾构机施工过程中最主要的问题之一, 影响盾构机排渣、正常掘进甚至掌子面土压平衡。渣土改良技术对于解决此类问题方便有效, 其中最常用的三种改良剂为: 泡沫剂、高分子聚合物以及膨润土泥浆。因此, 通过对泡沫剂的阻塞作用、黏附作用、时效性, 膨润土的级配优化、微观机理, 高分子聚合物的微观结构、化学成分展开分析, 得到改良剂对砂土渗透性的改良机理, 为砂性地层渣土改良奠定了理论基础, 对于富水砂层开挖“喷涌”问题来说具有重大意义。

## 关键词

泡沫剂, 高分子聚合物, 膨润土, 改良机理, 渣土改良

# Improvement Mechanism of Soil Conditioner on Sandy Permeability

Bin Zhi, Shuchen Li, Zhuang Duan

Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan Shandong  
Email: zhibinzy111@163.com

Received: Nov. 17<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2020; published: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2020

## Abstract

The sandy soil layer is a typical mechanically unstable formation. The spouting problem caused by its high permeability is one of the most important problems in the construction of the shield machine, which affects the shield machine's slag discharge, normal excavation and even the earth pressure balance of the tunnel face. The muck improvement technology is convenient and effec-

tive to solve such problems. The three most commonly used modifiers are: foaming agent, polymer and bentonite mud. Therefore, through the blocking effect, adhesion effect and timeliness of the foaming agent, the optimization of the gradation of bentonite, the micro-mechanism, and the analysis of the microstructure and chemical composition of the polymer polymer, the improvement mechanism of the sandy soil permeability of the modifier is obtained. Laid a theoretical foundation for the improvement of sandy strata and muck soil, which is of great significance to the "spraying" problem of water-rich sand excavation.

## Keywords

Foam, Polymer, Bentonite, Improvement Mechanism, Soil Condition

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

中国城市轨道交通通车里程数在过去几年快速增长,其中隧道工程的修建以盾构法[1]为主。盾构隧道工程穿越不同地层时,会遇到不同的工程技术难题。当土压平衡盾构穿越富水砂性地层时,由于地层中富含水且砂性土本身止水性较差,有可能会造成喷涌的发生,影响螺旋输送机的正常排渣以及掌子面的动态压力平衡。通过渣土改良[2]的技术手段可以改良土体的性质,是工程上防喷涌的重要手段之一。

国内外许多学者针对于渣土改良以及改良剂对应的改良机理展开了大量研究。Lars Langmaack [3]研究了施工中常见改良剂的改良机理和对不同地层的适应性,并通过现场试验,分析不同渣土改良的改良效果;王树英[4]从试验角度出发研究了泡沫剂对砂性土渗透性和流塑性的影响;赵军婷[5]以常见的三种试剂以及试验室现有的五种泡沫试剂为研究对象,理论研究与室内试验相结合,系统评价泡沫的起泡性和稳定性,并且从泡沫形貌和粒径尺寸这一微观角度对其展开分析;Peila [6]等设计了实验室螺旋输送机模型,以泡沫剂改良砂土进行试验,有效地证明了泡沫剂的改良效果;贺少辉[7]等以兰州地铁为例,综合使用室内试验、数值模拟、理论分析手段对喷涌控制进行了研究,并提出了相应的改良方案;张润来[8]等以成都地铁为例,提出在砂卵石地层中采用“泡沫剂 + 膨润土”的复合改良方式,改良效果要优于单独使用两种改良剂;茅华[9]、朱海军[10]、刘琦[11]等人以武汉和西安地铁等具体工程为例,分析了工程中喷涌发生时利用渣土改良技术的有效性。

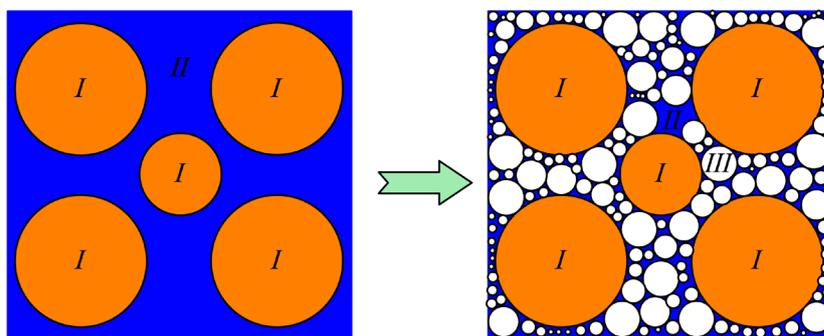
本文通过理论分析、微观结构等方面对泡沫剂、膨润土和高分子聚合物对砂土渗透性的改良机制展开分析,重点得到每种改良剂对于砂土渗透性的影响,为盾构穿越砂性地层过程中的渣土改良提供理论依据。

## 2. 泡沫剂的改良机制

泡沫剂是渣土渗透性改良的首选改良剂,它的成分包括发泡剂、稳泡剂、增稠剂,部分泡沫剂中还有引气剂。其中发泡剂为主要成分即表面活性剂,是泡沫产生的关键。

### 2.1. 阻塞作用

泡沫作为改良剂与砂土混合之后,相互作用,作用效果见图 1,泡沫充填在孔隙中,一定程度上阻断了渗流通道,大大降低了渗透系数,预防喷涌的发生。



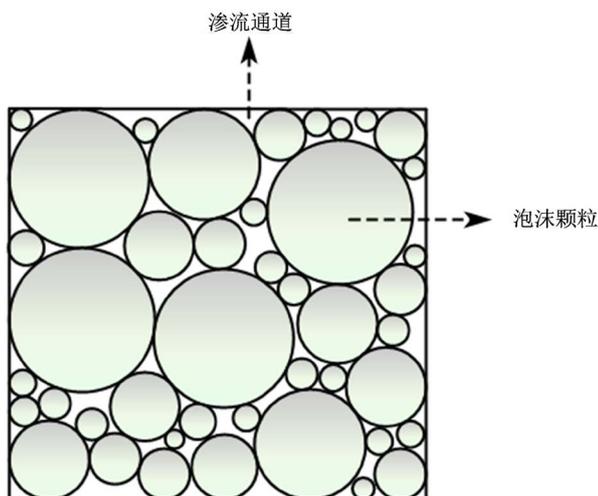
**Figure 1.** Conditioned soil by foam  
**图 1.** 泡沫改良砂土机制

图中，区域 I 为砂土颗粒，区域 II 为渗流通道，区域 III 为泡沫。未加泡沫时，砂土中渗流对应的有效渗流面积为  $A_1$ ，即 II 区域的总面积。水在砂土中的渗流可以将砂土视为多孔介质，且渗透性通过渗透系数的大小体现。根据已有研究表明，液体在气泡之间流动时，泡沫体系也可视为多孔介质，且认为它们和固体多孔介质有一定的相似性。参考 Kozeny-Carman 方程可得泡沫多孔介质中渗透系数的表达式如下：

$$k_f = \frac{n_f^3 g}{C\mu(1-n_f)^2 A_s^2} \quad (1)$$

式中， $k_f$  为渗透系数， $n_f$  为泡沫体系孔隙度， $\mu$  为运动黏度， $C$  为 Kozeny-Carman 常数， $A_s$  为泡沫体系中气泡的比表面积。

取泡沫体系结构进行分析，泡沫体系中孔隙的总体积即泡沫中的水量，而有效渗透面积为泡沫体系中湿润面积  $A_2$ ，即所有渗流通道截面的总面积，见图 2。



**Figure 2.** Conditioned soil by foam  
**图 2.** 泡沫体系横截面

结合达西定律以及方程 1 中泡沫介质的渗透系数可以得到截面内渗透水量  $Q$  为：

$$Q = A \cdot k_f i \quad (2)$$

式中,  $A$  为整个多孔介质中的有效渗透面积,  $i$  为水力坡降。对于泡沫和土体的混合介质而言, 渗透性可以由泡沫改良土整体渗透系数  $k_{s,f}$  表示:

$$k_{s,f} = \frac{Q}{S \cdot i} = \frac{Ak_f}{S} \quad (3)$$

式中,  $S$  为泡沫改良土的横截面积。砂土经过泡沫改良后, 泡沫占据原有的渗流通道, 使有效渗流面积由  $A_1$  变为  $A_2$ , 从而使得泡沫改良土的渗透性降低。

## 2.2. 黏附作用

表面活性剂是特指一类能显著降低溶液表面张力和界面自由能的物质。表面活性剂由较强的极性亲水基团和非极性憎水基团构成, 亲水基团朝向水中, 憎水基团则面向空气, 这也是泡沫形成的重要原理, 见图 3。

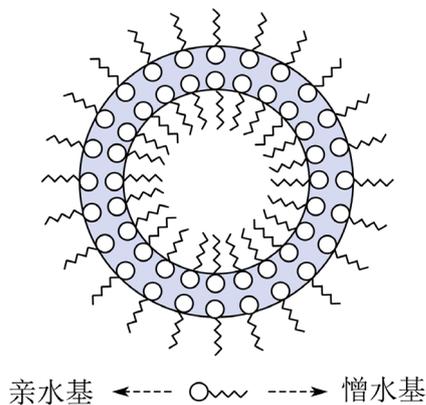


Figure 3. Foam structure  
图 3. 泡沫结构

泡沫体系由气液两相组成, 气体之间均以液膜相隔, 而体系中液体的流动与泡沫液膜的性质息息相关。由图 3 可以看出, 液膜上分布着表面活性剂, 因此液膜的具有一定黏度, 相比于液体在无泡沫剂的砂土中流动时, 流动过程中的黏滞阻力便会增大, 以及表面活性剂分子的吸附作用会增强对水的束缚力, 因此泡沫剂的使用会降低改良后砂土的渗透性。而且泡沫剂溶液黏度越大, 其液膜的黏度也必然大, 液体在泡沫体系中所受流动阻力越大, 提高砂土的抗渗性效果越明显。

## 2.3. 时效性

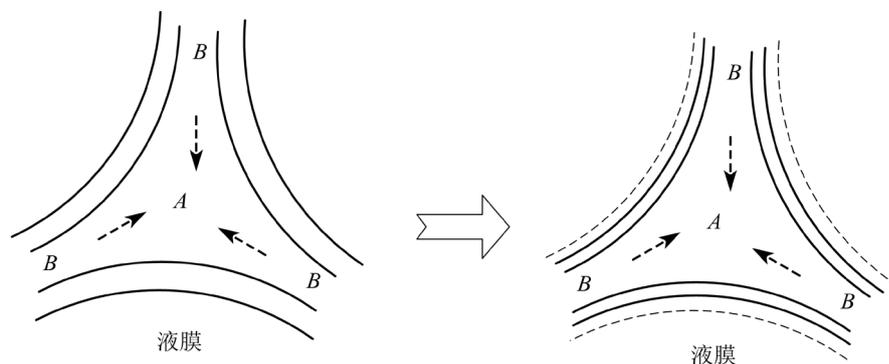
泡沫是一种亚稳态体系, 有着存在的“寿命”, 最终会完全消散。因此泡沫稳定性是研究泡沫的重要指标之一。在盾构隧道开挖过程中, 泡沫剂是最常用的渣土改良剂, 且泡沫稳定性以泡沫的半衰期为评价指标, 即泡沫有一半发生衰变消散所需要的时间。

Fameau 和 Salonen 将泡沫发生衰变的方式归结为以下三点: 液膜排液、泡沫合并、气体交换。

### 1) 液膜排液

泡沫形成初始阶段, 液膜较厚, 内部含液量较高, 在重力作用下发生排液, 使液膜逐渐变薄, 而重力对液膜排液的作用显著降低。

随着泡沫的不断运移, 相互接触, 最终泡沫之间会形成如图所示膜间夹角为  $120^\circ$ 、呈凹三角形形状的 Plateau 边界, 见图 4。

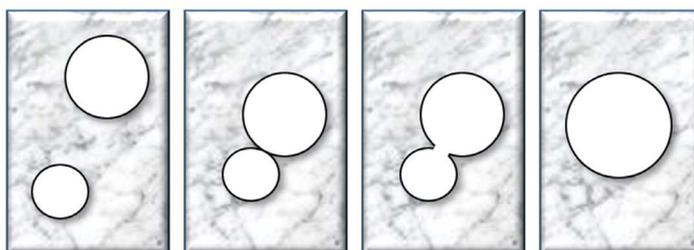


**Figure 4.** Plateau boundary of the foam system (liquid film becomes thinner with drainage)  
**图 4.** 泡沫体系的 Plateau 边界(液膜随着排液逐渐变薄)

随着液膜排液过程，液膜越来越薄，最终会导致泡沫破裂发生衰变。

### 2) 泡沫合并

当两个气泡相互接触时，经过亲水端基的水合作用，两个薄液膜会发生破裂并开始融合，且液膜排液有助于泡沫之间的接触、融合和合并，见图 5。



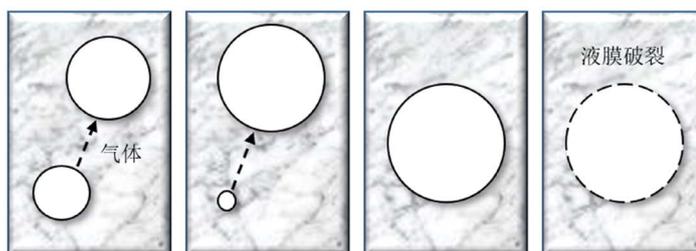
**Figure 5.** Bubble merger  
**图 5.** 泡沫合并

### 3) 气体交换

气泡之间的气体交换也是导致泡沫体系不稳定的一个因素。由 Laplace 方程可知：

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R} \quad (4)$$

式中， $R$  为气泡半径， $\sigma$  为表面张力， $p$  为气泡内压力。由于泡沫体系中粒径不均一，当气泡聚在一起时必会发生气体交换。由上式可知，气体总是由小气泡向大气泡扩散，最终小气泡越来越小，大气泡越来越大，直至破裂，见图 6。



**Figure 6.** Gas exchange  
**图 6.** 气体交换

### 3. 膨润土的改良机制

膨润土是土压平衡盾构机最早使用的渣土改良剂之一。对于砂性土的开挖，可以在掘进过程中向刀盘前方注入膨润土，形成具有改善塑性流动性能和降低渗透性的泥浆，进而改善对地下水渗透的控制和开挖面的支护。膨润土还可提供了土壤颗粒和盾构机器表面之间的润滑，从而降低了刀盘和螺旋输送机的扭矩，减少了刀盘、刀具等的磨损。膨润土常与聚合物和泡沫剂一起用于渣土改良。下面从级配优化、微观机理两方面研究膨润土对砂性土渗透性的改良机制。

#### 3.1. 级配优化

渣土改良目的是改变土体的性质，使其满足盾构机的开挖要求。而土作为三相体系，其三相间在体积和质量方面的比例关系一定程度上可以反映土体的性质和状态。

膨润土改良使得砂土体内的细颗粒增加，弥补了砂土的级配缺失问题，也改变了砂土的三相组成结构。膨润土添加使得砂土中的固相质量和体积增大，气液相减小，且膨润土作为细颗粒掺入砂土后，砂土整体的体积和质量增大，部分膨润土会进入孔隙内置换原有的气液相，降低它们所占比例，见图 7。

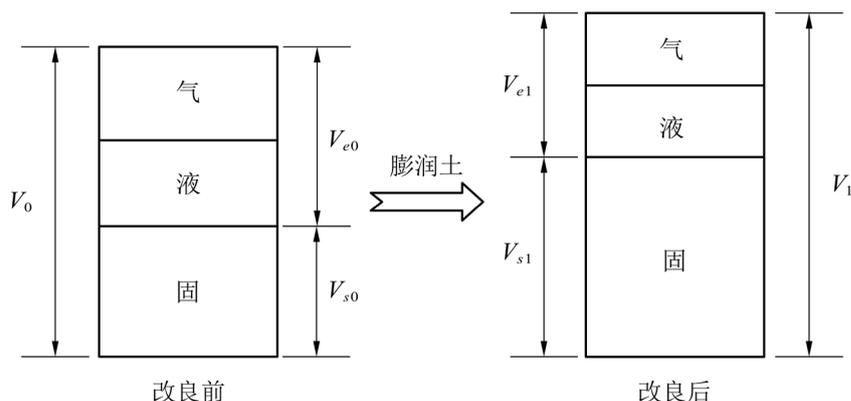


Figure 7. Three-phase composition diagram of sand before and after improvement of bentonite

图 7. 膨润土改良前后砂土的三相组成图

膨润土改良前后砂土体的孔隙度为：

$$n_o = \frac{V_{e0}}{V_0} \times 100\% \quad (5)$$

$$n_1 = \frac{V_{e1}}{V_1} \times 100\% \quad (6)$$

结合图 7，由于  $V_{e1} < V_{e0}$ ，且  $V_1 > V_0$ ，因此  $n_1 < n_o$ ，即膨润土改良后砂土的孔隙度会减小。根据 Kozeny-Carman 方程，改良后土体渗透系数随着砂土孔隙度的减小而下降，从而提高了土体的抗渗性。

#### 3.2. 微观机理

膨润土属于粘性细粒土，其主要成分为蒙脱石，本质上是一种铝硅酸盐晶体，由硅氧四面体和铝氢氧八面体基本单元构成，简化晶格结构见图 8。

由蒙脱石的微观晶格构造可知，晶层之间为联结力很弱的氧氧联结方式，水分子极易进入晶层之间，导致晶格膨胀。因此，膨润土亲水性极强，具有显著的吸水膨胀特性。

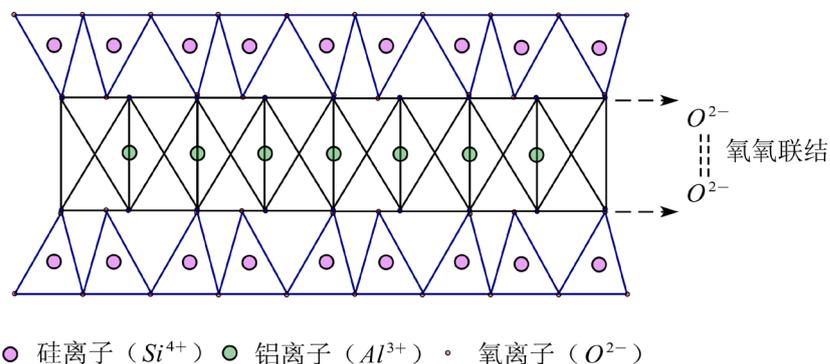


Figure 8. Microscopic lattice structure of montmorillonite  
图 8. 蒙脱石微观晶格构造

膨润土作为改良剂改良富水砂土时，可以从以下三方面体现膨润土对砂土渗透性的改良机制。

- 1) 由于其吸水膨胀特性，与水接触后使得渗流通道变窄，降低砂土的渗透系数，提高了砂土的抗渗性；
- 2) 膨润土与水接触会发生絮凝、胶结，形成泥膜，从而降低砂土的渗透性，见图 9。

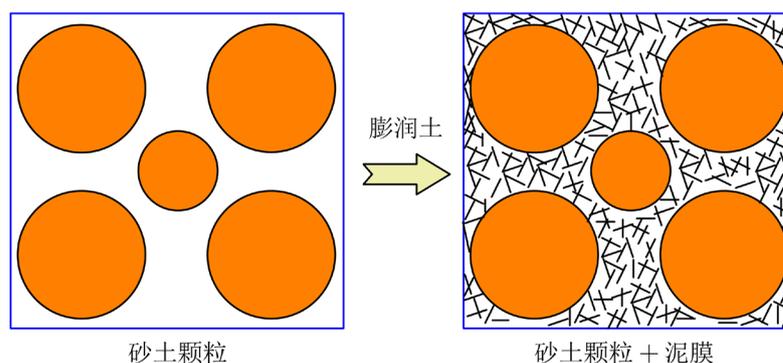


Figure 9. Mechanism of bentonite to condition sand  
图 9. 膨润土改良砂土机制

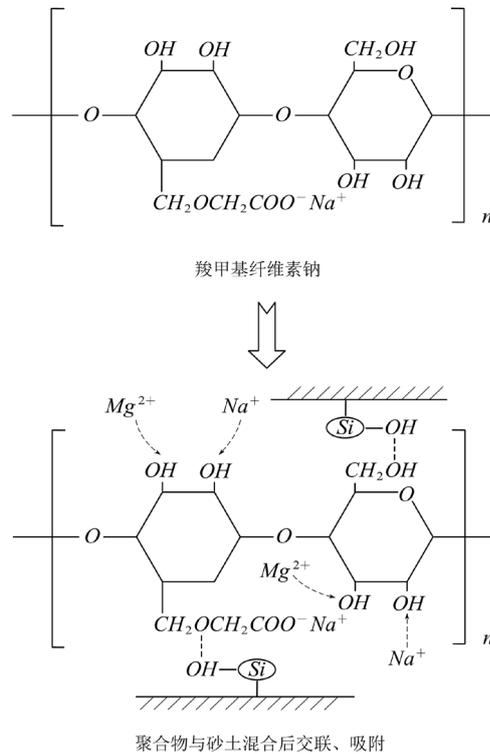
3) 膨润土本身为黏性土，为砂土添加黏性颗粒，使得渗流过程中水的粘滞阻力增大，降低砂土的渗透系数，提高改良后砂土的抗渗性。

#### 4. 聚合物的改良机制

聚合物是由大量重复的小分子组成的大分子高聚物，性质因其化学成分和结构而异。聚合物分子的大小(以分子量为特征)、连接在聚合物链上的支链或基团、链间的交联以及分子间的作用力都会影响聚合物的物理性质。

盾构隧道中聚合物作为渣土改良剂，具有很好的水溶解性能和泵送性能，常用的有羧甲基纤维素钠(CMC)、聚丙烯酰胺(PAM)、聚丙烯酸钠(PAAS)、瓜尔胶等。该类聚合物中均有羧基、羟基、胺基、醚基等亲水基团，且分子链上的羧甲基和羟基等基团中的氢键与砂土表面的  $Si-OH$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Na^{+}$  等离子交联吸附形成结构体，其中以聚合物 CMC 为例，改良砂土机制见图 10。

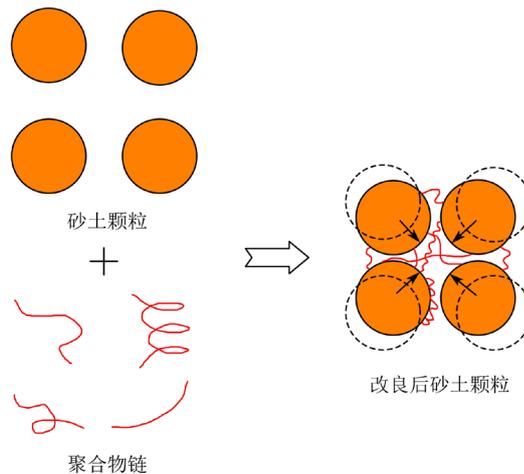
由图可得 CMC 与砂土发生大量的离子交换且有很多亲水基团，具有较强的吸水能力及黏附作用，提高砂土的黏聚力，达到改良砂土的目的。



**Figure 10.** Interaction between polymer CMC and sand  
**图 10.** 聚合物 CMC 与砂土相互作用

聚合物对砂土渗透性的改良可以归纳为以下几个方面：

- 1) 聚合物强大的亲水基团致使其具有高吸水性，可以吸收砂土中的水分并填充在砂土体孔隙内，使得土体中的含水量降低，有效渗透面积减小，降低改良后砂土的渗透性。
- 2) 聚合物与砂土相互作用，形成团聚结构体，提高了砂土的黏聚力，使得砂土颗粒之间的束缚性增强胶结在一起，拉近了颗粒之间的间距，使得孔隙率减小，结合 Kozeny-Carman 方程可知，降低了砂土的渗透系数，提高了砂土的抗渗性，见图 11。



**Figure 11.** Mechanism of polymer-improved sand  
**图 11.** 聚合物改良砂土机制

3) 聚合物作为改良剂与砂土颗粒混合, 由于其本身具有一定黏度, 使得渗流过程中水的黏滞阻力增大, 砂土的渗透系数降低, 达到提高砂土抗渗性的作用。

## 5. 结语

本文通过三种改良剂的微观结构进行理论分析, 分别从不同的角度分析其对砂土渗透性的改良机制, 得到如下结论:

1) 泡沫充填在孔隙中, 一定程度上阻断了渗流通道, 大大降低了渗透系数, 并推出泡沫改良砂土的整体渗透性表达式。且泡沫剂属于表面活性剂, 液膜具有一定黏度, 相比于液体在无泡沫剂的砂土中流动时, 流动过程中的黏滞阻力便会增大, 达到降低改良后砂土的渗透性的作用。

2) 膨润土改良后砂土的孔隙度会减小。渗透系数随着砂土孔隙度的减小而下降, 从而提高了土体的抗渗性。且膨润土本身的吸水膨胀特性也会使得改良砂土的渗透性降低。

3) 高分子聚合物的吸水特性提高了改良砂土的粘聚力, 降低了土体中的含水量, 提高了水在改良砂土中的黏滞阻力, 达到降低砂土渗透性的目的。

## 参考文献

- [1] 郑刚, 崔涛, 程雪松, 等. 某地铁区间盾构法施工隧道事故实例与分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(z2): 132-135.
- [2] 刘飞, 杨小龙, 冉江陵, 吴田涛, 杨鹏, 王树英. 基于盾构掘进效果的富水砾砂地层渣土改良试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 4(10): 1-7.
- [3] Langmaack, L. (2000) Advanced Technology of Soil Conditioning in EPB Shield Tunnelling. *Proceedings of North American tunneling 2000*, Boston, 6-11 June 2000, 525-542.
- [4] 王树英, 胡钦鑫, 王海波, 等. 盾构泡沫改良砂性渣土渗透性及其受流塑性和水压力影响特征研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(2): 94-102.
- [5] 赵军婷. 盾构泡沫性能评价和微观机理试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [6] Peila, D., Oggeri, C. and Vinai, R. (2007) Screw Conveyor Device for Laboratory Tests on Conditioned Soil for EPB Tunneling Operations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**, 1622-1625. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:12\(1622\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:12(1622))
- [7] 贺少辉, 张淑朝, 李承辉, 等. 砂卵石地层高水压条件下盾构掘进喷涌控制研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1583-1590.
- [8] 张润来, 宫全美, 周顺华, 等. 砂卵石地层土压平衡盾构施工渣土改良试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 673-680.
- [9] 茅华. 隧道施工盾构螺旋机喷涌应对措施[J]. 铁道建筑, 2014(10): 39-41.
- [10] 朱海军, 周明洋. 富水砂层地铁施工中的土压平衡式盾构机喷涌控制技术[J]. 建筑施工, 2018, 40(1): 100-102.
- [11] 刘琦. 富水砂层地铁施工的土压平衡式盾构机喷涌控制技术[J]. 中国设备工程, 2019(8): 174-176.