

# 改性膨胀土胀缩变形的研究进展

马俊杰, 秦立涛, 杨雨佳, 余加威

河北工程大学, 河北 邯郸

收稿日期: 2023年1月27日; 录用日期: 2023年2月17日; 发布日期: 2023年2月27日

## 摘要

膨胀土因其吸水膨胀、失水收缩的特性往往会对工程结构造成不可逆的损伤, 改性膨胀土便是通过添加改性材料来改变其微观结构与力学性质, 改善土体的胀缩特性, 解决因胀缩变形而引发的膨胀土结构破坏问题。在以往的研究中, 国内外学者通过对膨胀土力学性质与内部结构的探索, 逐步建立起了以晶层扩张理论和双电层理论为主流观点的膨胀土胀缩机理, 并采用物理、化学、生物(MICP技术)等单向或多种方法复合的方式对膨胀土的胀缩性质进行改良。将改良的原料慢慢地转向了煤矸石、粉煤灰等大型工业废料, 取得了显著的研究成果, 亦符合现代的绿色健康和可持续发展的理念, 在积极改善了土体结构性质的同时, 为我国工业废料的二次利用也提供了一个不错的解决方案。

## 关键词

膨胀土, 胀缩机制, 改良土, 力学性质

# Research Progress on Swelling Shrinkage Deformation of Modified Expansive Soil

Junjie Ma, Litao Qin, Yujia Yang, Jiawei Yu

Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: Jan. 27<sup>th</sup>, 2023; accepted: Feb. 17<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 27<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Expansive soil often causes irreversible damage to the engineering structure due to its characteristics of water absorption expansion and water loss shrinkage. Modified expansive soil changes its microstructure and mechanical properties by adding modified materials, improves the expansion and contraction characteristics of soil, and solves the structural damage problem of expansive soil caused by expansion and contraction deformation. In previous studies, domestic and foreign scholars have gradually established the swelling and shrinking mechanism of expansive soil

based on the crystal layer expansion theory and the double electric layer theory through the exploration of the mechanical properties and internal structure of expansive soil, and improved the swelling and shrinking properties of expansive soil by using one-way or multiple methods such as physical, chemical, biological methods (MICP technology). The improved raw materials are slowly turned into large industrial wastes such as coal gangue and fly ash, and remarkable research results have been achieved, which also conforms to the modern concept of green health and sustainable development. While actively improving the structural properties of soil, it also provides a good solution for the secondary utilization of industrial wastes in China.

## Keywords

Expansive Soil, Swelling and Shrinking Mechanism, Improved Soil, Mechanical Property

Copyright © 2023 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. 研究背景

膨胀土是一种细粒黏性土，含有较多的蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物，具有显著的吸水膨胀、遇水崩解软化、失水收缩的变形特性[1]，故也被称为“胀缩性土”[2]。当今广泛地分布在世界各地，遍及六大洲四十多个国家和地区，在我国的西南、华东、华北等地区 20 多个省份均有分布，覆盖面积超过了 60 万 km<sup>2</sup>。膨胀土主要以黄、褐、黑色为主，黏土颗粒一般在含量的 50% 以上，大部分为蒙脱石和伊利石，间杂有少许的高岭石，其中蒙脱石的胀缩性质最为明显，在环境干湿交替或冻融循环的作用下，膨胀土的体积会发生明显的膨胀和收缩现象，膨胀的最大限度甚至能够达到原体积的几十倍[3]。随着干湿交替和冻融循环的次数增加，土体本身会因为反复的体积膨胀收缩产生较多的裂缝，其内部结构遭到了永久性的破坏，抗压强度、抗剪强度等力学性质急剧下降，对建筑物、道路地基等基础设施造成不可逆的损害。

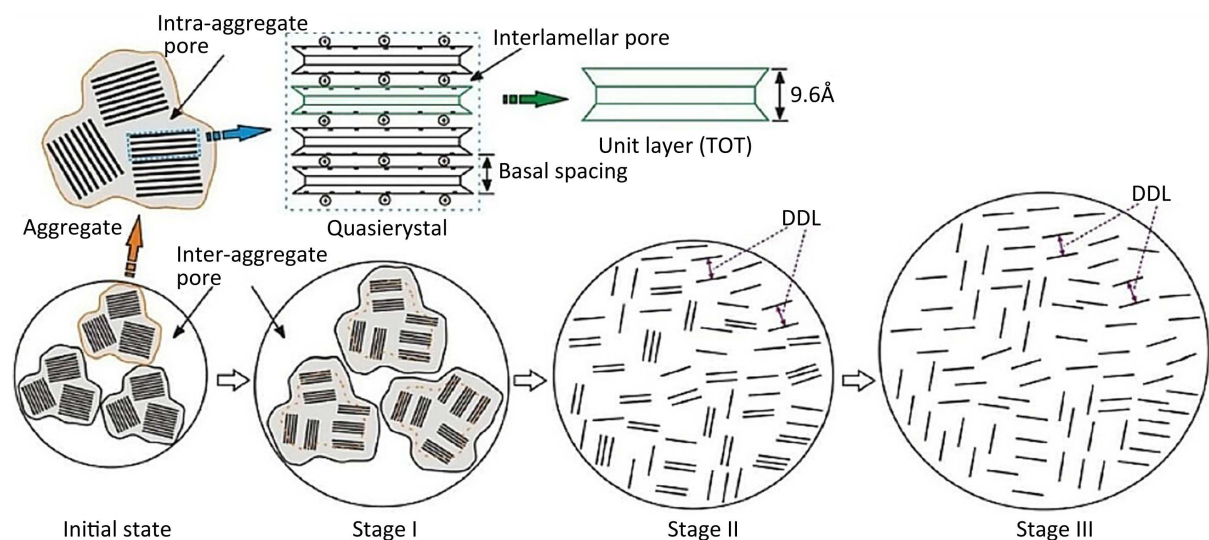


Figure 1. Schematic diagram of expansion process (Ye *et al.*, 2015)

图 1. 膨胀过程示意图(Ye *et al.*, 2015)

人类对膨胀土力学性质和微观结构的研究大约开始于 100 年前, 国外对膨胀土的研究开始于上世纪 30 年代, 美国工程界将它称为“隐藏的灾害”[4]。据统计, 美国每年要为解决膨胀土而花费数十亿美元, 这一花销甚至超过了洪灾、飓风和地震防护的总额, 国内从上世纪 60 年代才开始对膨胀土进行研究, 膨胀土问题对我国铁路线铺设和南水北调工程的进展造成了巨大的损害, 而受华东地区干湿循环频繁及东北地区水土冻融循环现象的影响, 膨胀土的胀缩性也为楼房道路等基础设施的建设带来了不小的损失。因此国内很多学者也开始对膨胀土进行了相对应的研究, 几十年来, 国内外对于膨胀土的研究主要集中在对膨胀土结构和力学性质的测试与判定, 而随着可持续发展战略的提出, 如何高效、科学、环保地降低或去除膨胀土的膨胀性, 降低其在工程建设中的成本, 减少其胀缩变形的特性对工程安全建设的危害, 避免后期的工程改造与再修复已经成为了一个值得研究的课题方向。

## 2. 膨胀土胀缩变形机理

膨胀土作为一种天然的黏性非饱和细粒土, 多由蒙脱石和伊利石组成, 所谓的膨胀土膨胀收缩, 其实就是土体内部结构在外部环境的影响下与水反应不断吸水扩张失水收缩的过程[5], 从内部结构上看, 蒙脱石和伊利石所具有的层状晶格结构为土与水之间的物理化学反应和最终水进入土体晶格中创造了有力的空间, 而外部环境的干湿循环则为水的转移提供了动力条件。目前国内外学者对于膨胀土的胀缩现象的机制都提出了不同的假设, 其中晶格扩张理论和双电层理论[6]被国内外学者普遍认同。

### 2.1. 晶格扩张理论

蒙脱石、伊利石和高岭石是膨胀土中含量最多的三大组分, 其胀缩变形的特性直接影响了土体的性质。膨胀土的胀缩变形主要受其内部的矿物成分和外部环境的影响, 由于蒙脱石具有较大的比表面积和良好的亲水性, 因此在土的天然含水量较低时, 膨胀土易于吸水膨胀, 蒙脱石本身为三亚层结构, 有两硅氧四面体晶层中间夹着一片铝氧八面体晶层构成, 相邻的两层硅氧四面体晶层之间只由范德华力链接, 连结力较弱, 而伊利石虽然也为三亚层结构, 但其内部各晶层之间由 K 键连接, 连结力较强, 不易被水分子破坏, 而高岭石结构为二亚层且以氢键连接, 所以结构更加的稳固。由于蒙脱石较弱的层间连结力, 水分子极易透过进入晶格之间形成水夹层, 使晶层之间距离扩大, 如图 1 Stage II、Stage III 所示, 宏观表现为膨胀土吸水膨胀, 因此蒙脱石是其中膨胀性最强的黏土矿物之一。

但是, 晶格扩张理论也有其自身的局限性, 其讨论的膨胀土吸水膨胀主要还是关于晶层扩张夹入水夹层造成的晶格微观物理结构上的变化, 进而宏观上导致膨胀土膨胀, 而没有研究黏土颗粒与土中凝聚体对水的吸附作用。但在实际的膨胀过程中, 膨胀土与水相遇, 两者形成电层对水分子的吸附也是土体膨胀的重要原因之一, Nelson *et al.* (2015)认为, 蒙脱石吸水膨胀与土壤中的阳离子水化和对水分子的吸引具有紧密的联系。Suzuki *et al.* (2005)和 Ye *et al.* (2015)的研究表明, 蒙脱石的主要膨胀为颗粒膨胀, 即层间阳离子与水反应水化, 大的颗粒晶体被分割成较薄的小片层进入周围的土体颗粒间隙中引起膨胀土膨胀, 而此时晶层保持不变, 如图 1 Stage I 所示。而且该理论主要还是解释了膨胀土吸水膨胀的原理, 对于失水收缩方面的研究并不深入。

### 2.2. 双电层理论

膨胀土的黏土矿物晶格中主要以硅氧四面体和铝氧八面体为主, 当土体颗粒与水接触后, 在固液二相物质表面的  $\text{Si}^{4+}$  和  $\text{Al}^{3+}$  容易与土中的  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  发生同晶置换而被取代, 使膨胀土颗粒表面带上负电荷形成负电荷膜, 根据异电相吸的原理土壤中的极性阳离子会被颗粒表面的吸引并按照规则排布在负电荷的周围形成正电荷膜。而在液相方面, 依次由内紧密层、外紧密层和扩散层组成, 如上图 2 所示。在

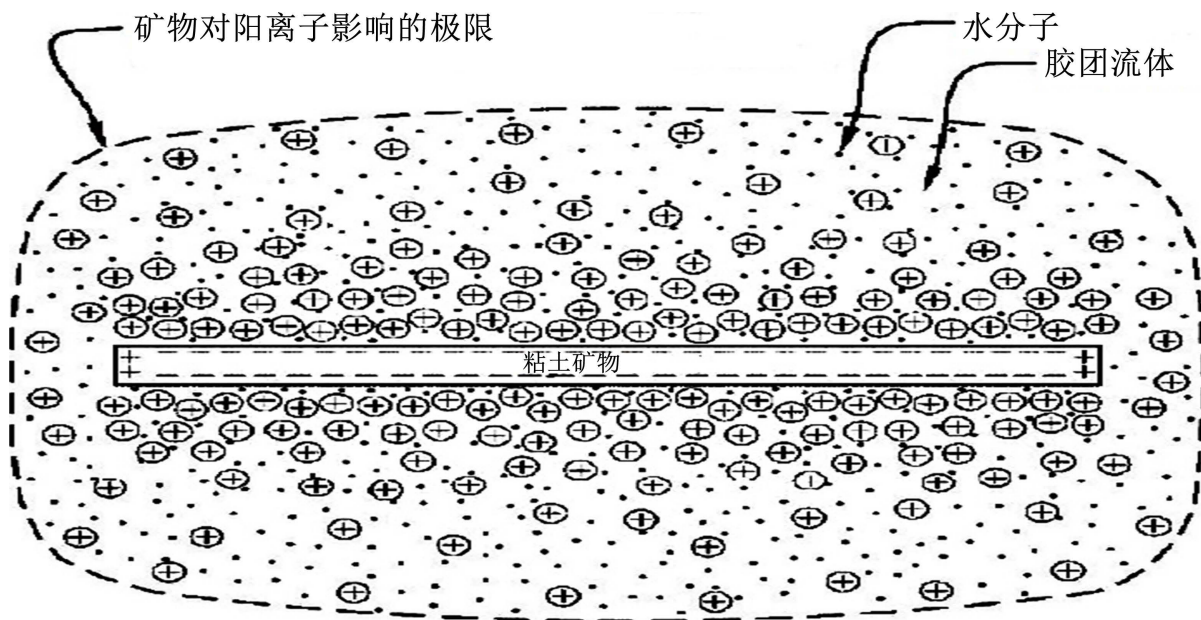


Figure 2. Hydration expansion process of montmorillonite (Nelson *et al.*, 2015)

图 2. 蒙脱石水化膨胀过程(Nelson *et al.*, 2015)

内紧密层，膨胀土水化膨胀主要依赖于土中阳离子水化产生能量，使水分子与特定吸附的水化阳离子按规律排布而成，而外紧密层则由部分按规律排列水分子和游离态的离子组成，扩散层则是由水中其余没有被吸附的游离态离子组成，随着各晶层间水的侵入，阳离子逐渐水化，较厚的晶体被分化成更薄的片层插入到土壤颗粒的缝隙中，形成土壤颗粒的膨胀，这也是土体膨胀的主要过程[7]。同时还有学者认为，双电层结构中的水化阳离子、特定吸附的阳离子和极性水分子会在土壤颗粒表面形成一层水化膜，膨胀土吸水变厚，失水变薄，当改变溶液成分和密度时，土体水化膜的离子浓度也随之改变，当外部溶液离子浓度过高时，双电层中的离子被外部的反号离子中和，双电子层变薄，导致土体失水收缩，进而抑制膨胀土膨胀变形，这一理论也很好的解释了膨胀土的收缩机理。

### 3. 国内外改性膨胀土研究现状

膨胀土作为一种高塑性黏性土，其本身拥有较高的承载力，且因其超固结性、胀缩性和裂隙性，是一种良好的工程用土。但其本身对外部环境的干湿变化和冻融循环具有极高的敏感度，多次大幅度的胀缩变形往往会对地基等工程基础造成毁灭性的破坏。自从上世纪 30 年代起，国外的研究学者首次对膨胀土问题展开了研究讨论，引起了大量的地质学者和岩土工作者的关注。自上世纪 70 年代起，我国拉开了城镇化进程的序幕，为了国家城镇的基础设施建设，也展开了对膨胀土研究的讨论，经过国内外学者数十年的不懈努力，膨胀土的研究已经从单一的课题变成了涉及土木工程、地质、岩土、土壤和环境等多个领域的交叉性课题，在多个方面都取得了不错的研究成果。为了能够尽量降低或去除膨胀土的强膨胀性。在研究其力学性质的同时以改造手段抑制或去除膨胀土的膨胀性[8]。并以此来抑制膨胀土的膨胀力作用与土体结构的膨胀变形破坏。在改造手段方面，目前主要还是以用物理、化学、生物手段对土体本身进行改造为主[9]。其中物理法主要是通过置换土体和利用力学结构对土体进行围护和支撑[10]或细砂和固化剂的掺入增加膨胀土的力学强度抑制膨胀，化学方法则是用石灰、水泥等化学原料对膨胀土进行改良以降低其膨胀性，而生物方式则是利用生物酶的催化作用对土中的钙离子进行转化沉淀成碳酸钙以加固土体。



### 3.1. 力学性质研究

膨胀土作为工程用土,其自身具有良好的承载特性,所以膨胀土大多数是受剪切力破坏,为了研究膨胀土的胀缩变形机理,探究其内部的微观结构[11],对其胀缩破坏予以限制,研究人员运用传统的土工试验对土体进行抗剪强度探究[12],为膨胀土的改良研究提供基础的理论数据和判断依据。崔子晏等[13](2022)通过对不同含水率的膨胀土进行直剪试验,分别探究了含水率和干密度对于土体应变、峰值剪应力和剪切强度的影响。当含水率小于20%时,应力-应变关系曲线接近线性变化,说明含水率较低时,膨胀土强度较高,峰值不明显,而当含水率大于20%后,剪应力呈现出随着位移增加,先增加后稳定不变的态势,且剪应力峰值随着含水率的增加大幅下降。膨胀土的峰值剪应力随着含水率的增加呈现出先增加后减小的态势,到达最优含水率时峰值剪应力达到最大值,其后逐渐下降,在接近最大土壤含水率时峰值达到最低值,约为最大峰值剪应力的三分之一。而黏聚力随着膨胀土含水率的增加呈线性下降的趋势,而内摩擦角则是随着含水率的增加先升高后下降,曲线基本符合二次函数的关系特征,内摩擦角的最大值出现在最优含水率附近。通过综合判断,含水率对膨胀土内部黏聚力的影响较大,随着土体含水率的不断升高,其内部黏聚力呈稳定明显的下降趋势,这主要的原因可能是因为随着含水率的增加,土体颗粒之间的间距变大,连接水膜减弱,而当土体含水率小于最优含水率时,土体的内摩擦角和峰值剪应力呈小幅上升的趋势,这可能是因为当含水率较小时,水分子对于大土块、凝聚体之间的咬合力的增加大于土体内部黏聚力的损失,而随着含水率超过最优含水率后,水将大量的填补上了土体之间的缝隙,大幅减小了土块土粒之间的摩擦作用,内摩擦角下降,导致土体整体的剪切力大幅下降。

### 3.2. 物理改良法

物理方法主要是根据上部结构对地基的承载力要求,以不改变土体内部成分和构造的物理方式对膨胀土地基进行加固改良的方法。一方面通过对土体夯实,增加膨胀土密度,减小内部孔隙率以减少水分子吸附的空间进而降低其吸水膨胀的能力。另一方面则是通过桩、筋等外部工具,对土体进行预压固结,使土的承载力达到预定的数值,以减少后期因吸水膨胀而带来的承载力丧失等一系列问题。从目前的研究成果来看,物理方法主要有置换法、排水固结法、夯实法和物理改良法。置换法便是将地基上部一定深度内的膨胀土挖出并回填上相应的胀缩变形较小、受侵蚀性低、强度高性能稳定的土,并且通过压实密集形成一层隔离垫层,来降低膨胀土的吸水膨胀变形。夯实法指的是用表面原位压实、强夯、振冲将土体挤密的方式,来将松软的土体压实,降低孔隙率。排水固结则是在地基施工前在土体表面施加预压力,到达指定标准量级后再卸载,或者是在土中设置排水带,上覆薄膜封闭,将膜内排水带的气体抽出使其达到真空状态以排出土体中的水分,使土体提前固结到达预定承载力以降低沉降变形。也有人通过电渗法和降水预压的方式,降低地下水位,最终将土中水排出,增大有效应力和边坡承载力,使膨胀土地基更加稳固。

除了上述的工程方法以外,学者们还探究了通过加入细砂、碎石[14]、纤维、煤矸石[15]等材料或废弃物来改良膨胀土,这些材料普遍具有力学性质稳定、不易膨胀变形、不与膨胀土颗粒发生化学反应的性质,将其细小颗粒填充进膨胀土的土体结构中去,用以填充膨胀土颗粒之间的吸水空间,增大土体颗粒之间的摩擦力,最终达到限制膨胀土吸水变形的目的。

巩齐齐、明文静[16](2022)通过研究干湿循环条件下,砂岩改良土的残余含水率变化和土体裂缝的发育程度,表明了砂岩改良土的蒸发速率和残余含水率变化幅度明显减小,裂缝平均宽度与最大宽度降低,土体受干湿循环影响减小,并且改良后膨胀土裂缝的最大宽度峰值大幅下降,并靠近平均裂缝宽度峰值,说明改良后土体裂缝发育较为平均,各部分承载能力更加平衡内部结构整体稳定性更高。相比于以往对于膨胀土膨胀变形裂缝的研究,没有对裂缝总量的变化进行对比,而且由于改良前后裂缝平均宽度峰值

的变化并不明显,这就说明裂缝虽然更加平均,但土体结构的整体稳定性可能并没有太大的改观。罗秀云等[17](2022)系统的研究煤矸石改良膨胀土的表面特性,认为煤矸石粉的加入使膨胀土内部粗糙程度增加,裂隙的出现时间明显推迟,裂隙面积率大幅下降,从而有效的限制了膨胀土的收缩变形。但是,煤矸石对于膨胀土的改良往往不仅是对于其内部结构粗糙程度的改变,煤矸石中富含大量的高价阳离子,根据双电层理论,遇水时这些阳离子会置换出土体表面的低价阳离子,使水夹层厚度变薄,这也在一定程度上抑制了膨胀土的膨胀变形。李坤鹏等[18](2021)通过无荷膨胀率实验和直剪试验,研究了用引江济淮工程中的废料砂岩改良沿线膨胀土的可行性。在相同的初始含水率下,改良土的膨胀率和黏聚力随着砂岩粉掺量增加而下降,内摩擦角则相反随之上升。首先这是因为未掺岩粉的膨胀土颗粒多以片状结构为主,土体结构中存在着大量的裂缝,掺入岩粉改良后,土体间的裂缝被粉粒占据,土粒之间更加紧密,摩擦力增大,其次岩粉的掺入改变了土体的孔隙比,使整体结构的透水性增强,膨胀土颗粒之间的弱结合水膜变薄,而且掺入的岩粉本身也不具备膨胀潜势,这都在一定程度上减小了土体的膨胀性。但是此次试验并没有考虑到干湿循环和冻融循环对于改良膨胀土性质的干扰作用,对于长期条件下改良效果和不同岩粉级配的问题还有待进一步完善。不过物理改性往往具有工程量大、改性时间较长,成本较高等缺点,在大型工程项目中往往难以运用实施。

### 3.3. 化学改良法

化学法改良指得是将改良材料掺入目标膨胀土中,在水土二相环境的条件下,材料与土体中的矿物成分发生化学反应,生成新的产物以改变矿物的内部结构和特性或者是产生凝结反应生成胶状物来增大膨胀土内部的摩擦力和咬合力以此抑制其膨胀潜势。还可以根据双电层理论的研究成果,在水土环境下加入大量的阳离子溶液以减少土体颗粒表层的水化膜厚度来减少膨胀土的吸水膨胀。目前,化学改良法因其工期较短、效果持续时间长、造价低等优点而被大量的应用,同时改良材料也慢慢的从石灰、水玻璃等传统的石化产物逐渐转向离子改良剂和高分子改性剂等一些新型无机材料,并且随着可持续发展战略与绿色环保理念的深入人心,粉煤灰等工业生产的废弃物也慢慢的进入了膨胀土改良材料的视野之中,因其废物利用性和成本较低等特点而受到了广泛的关注。余颂等[19](2006)通过对 CMA 改良膨胀土的物理性质、击实特性、胀缩特性、力学特性进行了三种配方的对比试验,发现其自由膨胀率和亲水性大幅下降,无侧限抗压强度和抗剪强度较高,粒度组成接近于粉土。武雷杰等[20](2020)通过自由膨胀率、颗粒分析、界限含水率、扫描电镜等实验对聚合氯化铝(PAC)改良膨胀土的膨胀变形特性进行了研究,并与活化硅酸钠改良的膨胀土构成了对比试验,结论认为 PAC 和硅酸钠都可以降低膨胀土黏粒组含量,低含量时 PAC 的改良效果更好,而粉粒和砂粒的组含量在改良后都会上升,从液、塑限变化趋势来看, PAC 在降低膨胀土吸水率方面具有更好的性能。而在自由膨胀率变化曲线中, PAC 对自由膨胀率的影响呈现出先降低后升高的特性,这是因为 PAC 改良膨胀土中会产生大量絮状物将膨胀土内部的填充,并且在水分子的参与下会电离出大量高价的铝离子和氢氧化铝絮凝物,降低土粒表面的电荷,减小它们之间的排斥力以降低膨胀土的胀缩性,但大量的 PAC 会使产生的絮凝物的体积大于土体自身颗粒堆积体积的增加量,故在总体上呈现出体积增加的变形。上述两种膨胀土离子改良剂,由于其设计的针对性,往往都会对改良土体起到远胜于普通的物理化学改良方法的改良效果,对于 CMA 改良膨胀土性质方面并没有产生其他的负面效果,但是 PAC 在改良膨胀土时,当掺入量大于 6%后,其无荷膨胀率出现了明显的提升,这是因为大量的高价络离子通过电中和改变了土体颗粒表面的电性,使其相互排斥导致土体膨胀性明显升高,甚至高过了由同样掺和量硅酸钠改良的土体,这就说明,离子改良剂效果虽然较好也无副作用,但由于其离子含量问题往往会由于其带电性而造成膨胀性的增加,因此在使用时需要对土体中的离子含量进行更加细致的把控。康靖宇等[21](2019)通过水玻璃改良膨胀土的室内试验,表明随着水玻璃

含量的增加,土中的黏粒含量和亲水性矿物减少,最大干密度降低而最优含水率升高,击实曲线逐渐平缓,改性土的膨胀特性得到明显抑制。与上述两种离子改良剂相比,硅酸钠虽然也可通过产生硅酸凝胶而与土体颗粒缩聚组成整体性与强度更好团粒并以此来抑制土体的膨胀性,但由于其作用原理较为单一,所形成的空间结构及其约束性也远远低于 PAC 等离子改良剂,但由于硅酸钠改良机理具有较好的普适性,所以在实际的工程改良中往往也具有很大的实用性。Amin Soltani 等[22] (2021)考察了阴离子聚丙烯酰胺 (PAM)基材料作为环境可持续添加剂稳定膨胀土,实验进行了稠度限值、沉积物体积、压实度和固结循环胀缩实验。结果显示,改良膨胀土的膨胀和收缩应变随着胀缩循环次数的提高而下降,在 4 次时基本达到动态稳定,膨胀和收缩潜势明显降低。

为了更好地结合物理法与化学法改良膨胀土胀缩性,加强改良后的力学特性,部分学者选择物化联合的方式利用复合材料对膨胀土进行改性处理。安枫垒等[23]在水泥 + 粉煤灰改性膨胀土的基础上加入了玄武岩纤维和天然砂进行了进一步的改良,并研究了经过二次改良的膨胀土在冲击荷载作用下的动态力学特性,结果显示,改良土的应力 - 应变曲线分为弹性变形、塑性屈服硬化及破坏变形三个阶段,掺入玄武岩纤维后,土体的冲击破碎分形维数随掺量的增大呈线性减小趋势,而掺入天然砂后,其冲击破碎分形维数随掺量增大而逐渐增大,玄武岩纤维的改良效果优于天然砂。郝健斌等[24]通过粉煤灰 - 剑麻纤维复合材料改良膨胀土,研究其力学性质的变化,并观察裂缝发展规律,观察到复合材料改性土在轴向压力作用下呈现出塑性鼓胀破坏,且裂而不断,裂隙大多细短,吸湿后易再次复合,有效的减小了裂隙尖端的应力集中。以上两种物理化学结合改良研究成果在原理上其实都是先利用改良材料的颗粒性增加土体内部摩擦力,并根据其自身的非膨胀性降低其膨胀潜势,再由化学试剂与土体内部的离子或者元素进行反应,以降低水膜层厚度或者产生络合物增加内部的黏聚力来抑制土体的膨胀性,不同的是,前者更加依赖于水泥与粉煤灰等化学试剂对土体结构的改变,而剑麻纤维的修复更多的是利用纤维的摩擦力和韧性来降低膨胀性的。

但是化学法在使用的同时,化学试剂和混合产物往往会对环境产生不良影响。因此,近些年来,在普遍使用化学物理法的基础上,国内外学者渐渐的将研究的方向转向了生物法改良方面。

### 3.4. 生物改良法

生物法改良膨胀土的原理是将培养好的微生物改良材料和相应的生物酶掺入土中,依靠生物酶的催化作用,促进微生物与土体中的化学元素进行反应,利用微生物或其反应代谢产物对土体结构和成分构成进行改造,最终对膨胀土的胀缩变形起到抑制的作用[25]。由于生物酶的本质是蛋白质,而且微生物的繁殖速率较快,该类方法在绿色环保方面的优势远远高于传统的物理化学改良方法。具有广阔的应用前景。喻成成等[26] (2022)将细菌浓度与脲酶活性做控制指标,研究了不同培养条件下的巴士芽孢杆菌的生长特性,确定了最有利于细菌生长温度、PH 值和摇床震荡速率,通过对比 MICP 技术(微生物诱导碳酸钙沉淀技术)改良前后的膨胀土的自由膨胀率、无荷膨胀率、黏聚力、内摩擦角和抗剪强度等力学特质,结果显示,改良后膨胀土的膨胀率皆大幅减小,黏聚力和内摩擦角能力学特征均有提高,并以微观角度阐释了 MICP 改良膨胀土的作用机制。杜静等[27] (2012)通过添加不同菌株的自由膨胀率实验,筛选出对膨胀土的胀缩变形影响明显的菌株,分别将其培养到微生物改性膨胀土和普通膨胀土之中,对土体进行线缩性实验和直剪试验,发现改良膨胀土的抗剪强度升高,线缩性得到明显改善,膨胀土转为弱膨胀性。Bang.S [28]等(2001)通过 MICP 技术,将水性聚氨酯乳液加入混凝土中,诱导微生物产生碳酸钙沉淀以修复混凝土中的裂缝,为使该技术改良膨胀土提供了优良的范例。Zamani A [29]等(2018)通过用 MICP 技术对粉砂土进行改良,结果表明,改良后的粉砂土在不排水剪切过程中产生的超孔隙水压力明显降低,进而通过扫描电镜实验对改良膨胀土的内部土粒结构进行了探究,发现微生物诱导的的碳酸钙沉淀对粉



砂土体之间的微观结构具有明显的胶结作用，这也揭示了 MICP 技术改良膨胀土提高其抗剪强度的微观机理。

### 3.5. 各类改良方法的优缺点与研究现状

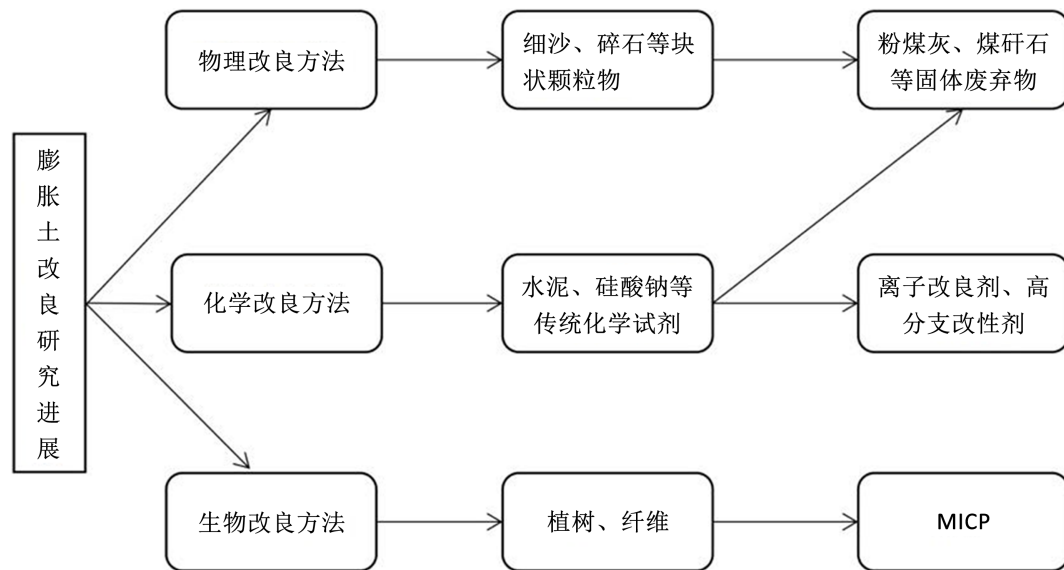


Figure 3. Research progress of expansive soil improvement

图 3. 膨胀土改良研究进展

由图 3 所示，膨胀土的改良总体上分为物理、化学、生物三种方式，其中物理方法最初的研究主要集中在将细砂、碎石等块状颗粒物掺入膨胀土中利用其本身不具有膨胀性和增加土体内部的摩擦力为主要改良机理来降低膨胀土的膨胀潜势，抑制其膨胀性，由于其本身具有工程量大、成本较高等缺点，所以各界学者开始探究更加方便、适宜的改良方式，但因为该方式的普适性和施工方式简单等优点，现在仍被大量工程所使用。

化学改良法主要是研究通过化学试剂引起土体水膜中的离子交换从而减小水膜厚度或者形成凝胶、络合物等对土体内部微观结构进行改造，以控制其膨胀，具有远胜于普通物理改良的效果，但是由于化学试剂成本较高，且大多会对土体产生难以消除的工业化污染等缺点而无法被大量使用。为了能够更好的改良膨胀土，专家学者们开始将更多的研究目光放在了离子改良剂与高分子改性剂上，这种新型的化学改良方式因其具有非常良好的改性效果而一度被广泛的研究，各种改良剂也是不断地被研究出来，但其本身往往是针对于某一地特殊土壤所研究制造的，改良效果不具有普适性，最终由于掺和方式繁杂、成本较高且普适性较低等缺点而无法被广泛的应用。而近些年来为了能够更好遵守可持续发展观和绿色发展理念，煤矸石与粉煤灰等大型固体废弃物开始被广泛的研究用于土体改良，由于其往往含有丰富的化学离子，同时又具有良好的力学性质，可以同时利用物理化学两类改良法的原理对土体进行改良，且成本低廉，得到了广泛的研究和应用。

生物改良法一开始只是利用生物纤维和树木根系对边坡土体维护进行改良防治，而随着近几年 MICP 技术的提出和开发而逐渐被广泛关注，MICP 主要由微生物岩土技术和微生物岩土加固技术两方面而组成，主要原理便是利用生物酶促进微生物沉淀碳酸钙，从而改变土体结构，达到抑制土体膨胀的目的。由于其造价低、安全环保、速度快、效果好等一系列优点而成为了一个新的热门研究方向，但目前仍处于室内研究阶段，主要原因还是在其对于工程环境要求较高，无法保证生物酶的活性而导致的无法投入



工程使用。目前仍有大量专家学者在关注的生物改良方向。

总的来说,目前膨胀土的改良主要的热门研究方向集中在 MICP 技术、离子改良剂及高分子改性剂与固体废弃物改良土三个大的方面,整体的研究方向从简单的工程性能向安全环保与试剂掺和技术与普适性等方面集中。

#### 4. 结论与展望

改性膨胀土作为一个困扰着人类大量基础设施建设的领域,在过去的 100 年里,随着科学技术手段的提升而不断地建立起完整的理论技术体系,取得了显著的发展。膨胀土作为岩土工程领域的一个分支,虽然在其本身的胀缩过程、微观结构方面已有了重大的突破,但在改良土方面仍然存在着较大的上升空间。实际工程需要考虑节省成本,而研究成果在工程中实际应用则要考虑成本、政策等多方面因素,上述的物理、化学和生物等方法虽各有成效,但是也各自存在着不小的问题,其中物理方法对于细砂石等材料用量过大,成本较高且施工难度较大,而化学方法却对土壤产生二次污染与现在的绿色发展理念不符,而且现实施工中对于石灰水泥等化学原料的用量和搅拌技术具有较大限制,不易大规模使用,而生物技术的研究现在还处于理论阶段,对于微生物的培养条件过于苛刻,且其反应速率受环境影响较大,在实际的施工操作过程中很难满足。

在目前各领域相互发展、共同发展、多学科交叉进步的大环境下,膨胀土作为一项由多领域涉及的岩土工程分支,应该与化学、生物、环境等学科开展跨领域合作,为其他领域提供充足的实验数据与先进的研究方向,建立起完整的交流合作机制,提升专业间的学术交流讨论,共同打造“环境友好,节约成本”的岩土工程理论-技术体系。

#### 致谢

历时将近两个月时间终于把这篇论文写完了,在这段充满奋斗的历程中,带给我的学生生涯无限的激情和收获。在论文的写作过程中遇到了无数的困难和障碍,都在同学和老师的帮助下度过了。尤其要强烈感谢我的论文指导老师—徐博会老师,没有他对我进行了不厌其烦的指导和帮助,无私地为我进行论文的修改和改进,就没有我这篇论文的最终完成。在此,我向指导和帮助过我的老师们表示最衷心的感谢!

同时,我也要感谢本论文所引用的各位学者的专著,如果没有这些学者的研究成果的启发和帮助,我将无法完成本篇论文的最终写作。至此,我也要感谢我的朋友和同学,他们在我写论文的过程中给予我了很多有用的素材,也在论文的排版和撰写过程中提供热情的帮助!

金无足赤,人无完人。由于我的学术水平有限,所写论文难免有不足之处,恳请各位老师批评和指正!

#### 参考文献

- [1] 惠会清,张生录. 阳离子型添加剂改良膨胀土研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2007(3): 61-64.
- [2] 韦晨. NaCl 溶液对改性陕南膨胀土强度变形特性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2020.
- [3] 李淼. KCl 溶液改良膨胀土的膨胀性及强度试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2020.
- [4] 黄春丽,阮永芬,李志伟等. 改性膨胀土的膨胀率研究[J]. 硅酸盐报, 2019, 38(12): 3759-3766.
- [5] 徐永福. 膨胀土的水力作用机理及膨胀变形理论[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 1979-1987.
- [6] 张伟利. 化学法改良膨胀土的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- [7] 叶加兵. 蒙脱石与 NaCl 溶液对膨胀土残余膨胀特性和土水特性影响的研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2019.

- [8] 徐永福, 程岩, 唐宏华. 膨胀土边坡失稳特征及其防治技术标准化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 1-20.
- [9] 王澄菡, 查文华, 王京九. 膨胀土的胀缩机理及新型处理方法综述[J]. 路基工程, 2020(2): 6-11.
- [10] 邹维列, 蔺建国, 韩仲, 等. 膨胀土边坡加固技术研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 126-139.
- [11] 刘正楠, 张锐, 唐德力, 等. 膨胀土微结构对膨胀行为的影响[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 1-11. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20220128.2336.006.html>, 2022-11-05.
- [12] 雷胜友, 袁文治, 翟志刚, 等. 盐溶液质量分数对非饱和膨胀土抗剪强度的影响[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 178-184.
- [13] 崔子晏, 张凌凯. 北疆供水一期工程膨胀土的力学特性及微观机制试验研究[J/OL]. 水利水运工程报, 1-10. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1613.tv.20220402.1913.006.html>, 2022-11-05.
- [14] 许英姿, 黄政棋, 苏超, 等. 掺碎石改良宽度对膨胀土侧向膨胀力影响研究[J]. 铁道科学与工程报, 2021, 18(6): 1456-1463.
- [15] 张雁, 殷潇潇, 刘通. 煤矸石改良膨胀土特性及其最佳掺量条件下的孔隙结构表征[J]. 农业工程报, 2018, 34(22): 267-274.
- [16] 巩齐齐, 明文静. 崩解性砂岩改良膨胀土的裂隙发育规律研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(2): 73-81.
- [17] 罗秀云, 张雁, 朱红星. 干湿循环下煤矸石改良膨胀土表面特性研究[J]. 非金属矿, 2022, 45(1): 31-33+36.
- [18] 李坤鹏, 姚彦彦. 砂岩改良膨胀土试验研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 147-150.
- [19] 余颂, 陈善雄, 许锡昌, 等. 中膨胀土 CMA 改性室内试验研究[J]. 岩土力学, 2006(9): 1622-1627.
- [20] 武雷杰, 杨秀娟, 张路, 等. 聚合氯化铝(PAC)改性膨胀土的胀缩特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(1): 84-89.
- [21] 康靖宇, 王保田, 单熠博, 等. 水玻璃改良膨胀土的室内试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(5): 267-271.
- [22] Soltani, A., et al. (2022) Intermittent Swelling and Shrinkage of a Highly Expansive Soil Treated with Polyacrylamide. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **14**, 252-261. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.04.009>
- [23] 安枫垒, 颜超. 水泥+粉煤灰改良膨胀土路基动态力学特性试验研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(5): 25-30.
- [24] 郝建斌, 张焕, 李耕春, 等. 粉煤灰-剑麻纤维复合改良膨胀土强度及裂隙发育特性[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(9): 2620-2628.
- [25] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 1-14.
- [26] 喻成成, 卢正, 姚海林, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀改性膨胀土试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S1): 157-163+172.
- [27] 杜静, 周东. 微生物改良膨胀土的试验研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(7): 103-105+87.
- [28] Bang, S.S., Galinat, J.K. and Ramakrishnan, V. (2001) Calcite Precipitation Induced by Polyurethane-Immobilized *Bacillus pasteurii*. *Enzyme and Microbial Technology*, **8**, 404-409. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(00\)00348-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(00)00348-3)
- [29] Zamani, A. and Montoya, B.M. (2018) Undrained Monotonic Shear Response of MICP Treated Silty Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **44**, Article ID: 04018029. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001861](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001861)