

(京) 新登字 035 号

图书在版编目 (CIP) 数据

工程建设中的膨胀土问题/刘特洪著. —北京: 中国建筑工业出版社, 1998
ISBN 7-112-03383-7

I. 工… II. 刘… III. 膨胀土-研究 N. TU443

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 16133 号

本书是论述膨胀土工程问题的专著, 书中应用现代土力学理论, 结合工程建设中的一些典型问题 (特别是渠坡稳定问题), 探讨和阐述了涉及膨胀土的一系列概念知识、设计施工理论和工程技术。书中对膨胀土的结构特性、工程特性、原位测试方法和结果、膨胀土的胀缩机理和力学模型、膨胀土地区中水工建筑物的设计、原型监测与稳定性预报, 以及水利工程中膨胀土问题的典型处理方法等方面均有深入的论述, 并援引和分析了一些工程实例。此外, 本书中还概略地介绍了一些当前岩土工程界以及工程实践领域中正在探索和引用的与膨胀土问题有关的新概念、新理论和新技术。

本书可供从事各类工程的勘测、设计和施工工程技术人员以及大专院校土木工程专业和工程地质专业师生参考。

责任编辑 褚冬梅
责任设计 黄 燕
责任校对 赵明霞

工程建设中的膨胀土问题

刘特洪 著

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
新华书店经销
北京市兴顺印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 3/4 字数: 407 千字
1997 年 12 月第一版 1997 年 12 月第一次印刷
印数: 1—1400 册 定价: 35.00 元

ISBN7-112-03383-7
TU · 2619 (8528)

版权所有 翻印必究
如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

序

我国广大地域孕育着埋深、层厚和分布范围大小不等而又性态各异的膨胀土层，在各类岩土工程的实践中，诸如房屋和桥梁地基、水利、交通工程以及地下民防建设中均时有遇到。对它的认识和处理涉及到一系列的理论与工程技术问题，多年来一直是困惑着人们的难点。近年来由于我国建设规模愈趋庞大，考虑的设计、施工技术更需慎密周全，有关膨胀土的研究已经日益引起人们的深切关注。

最近有机会读阅到刘特洪先生于1995年12月编写完成的《工程建设中的膨胀土问题》书稿，感到深受鼓舞和教益。该稿是作者80年代参加主持南水北调中线工程时对膨胀土进行深入系统研究的工作总结，同时又汲取了当前国内外有关膨胀土工程的理论与技术成果，加以进一步深化阐述，书中特别对膨胀土体结构面的成因类型及其特性、膨胀土变形与强度特性的测定、膨胀土渠坡变形位移的原型监测与分析、膨胀土的本构模型及其数值求解以及水利工程中对膨胀土问题的处理等等方面更具创新和特色，在国内外已有文献中似尚不多见，这是非常难能可贵的。

已如上述，该书既富理论内涵，又有重要的工程实用价值。事实上，一些研究成果无论在内容和方法方面都已经在南水北调等重大水利工程中得到了成功采用。相信该书的问世对广大岩土工程工作者将会极有助益。谨此，在本书正式付梓之际，我乐于写述一点浅见以志祝贺之忱。

孙 钧

1997年2月16日
于上海同济大学

孙钧教授系中国科学院院士，国际岩石力学与工程学会副主席、中国岩石力学与工程学会理事长暨中国国家小组主席，中国土木工程学会副理事长，同济大学校务委员、岩土工程系名誉系主任。

绪 言

膨胀土是在自然地质过程中形成的一种多裂隙并具有显著胀缩性的地质体，粘粒成分主要由强亲水性矿物蒙脱石与伊利石组成。膨胀土吸水膨胀、失水收缩并且反复变形的性质，以及土体中杂乱分布的裂隙，对建筑物尤其是对轻型建筑、路基、机场、渠道边坡以及堤坝等都有严重的破坏作用，特别是对建筑物所产生的变形破坏作用往往具有长期潜在危险的特点。水利工程中的膨胀土问题尤其突出，不少渠道工程与水库岸坡在施工期与运行期就发生过严重的滑坡，为此分别作过多种方法的综合性处理，耗费了巨大的工程费用。现时，膨胀土问题已受到岩土工程科学工作者和工程师们普遍的关注，并从不同的角度、途径和目的进行探索，采用不同的理论和方法来解释和论证其工程性质，并针对不同的工程问题提出有效的处理措施。

南水北调中线工程的膨胀土问题，无论从其影响范围、重要性和复杂性，以及问题研究的深度和广度来说，都可说是一个难得的典型。该工程是涉及国民经济建设重大决策的一项大型水资源调配工程，沿线经过膨胀土地区的挖方渠段长约180km，其中有些渠段需考虑隧洞引水，有些渠段则需利用膨胀土填筑堤坝。为此，水利部南水北调办公室和长江水利委员会综合勘测局于1984年组建膨胀土科学研究小组，对南水北调引水渠道沿线膨胀土的发育规律、工程性质、膨胀机理理论以及膨胀土工程处理措施等开展了系统的专题研究，并进行了渠坡变形破坏的原型监测。作者主持了该项研究工作的全过程。本书即系作者在对该项研究成果全面系统总结分析的基础上，吸取了国内外有关膨胀土工程的理论与先进技术，结合工程领域中涉及的膨胀土问题，探讨和系统阐述了膨胀土的一系列特殊性质及膨胀土工程技术的著作。书中重点反映出如下几项突破性的研究成果：

1. 膨胀土体结构面的成因类型及其特性的研究

分析和阐述了不同成因类型膨胀土的结构面具有的特定形态和组合形式，不论是宏观结构中的软弱层还是微观结构中的叠聚体，其形状与排列方式都与初始应力状态和沉积环境有关。由张力应变形成的陡倾角裂隙，其裂面粗糙；而由水平应力差产生的缓倾角裂隙，其裂面则具腊状光泽，两者的力学特性也截然不同。研究结果表明，膨胀土裂隙与软弱层的研究是揭示膨胀土胀缩性能和力学性质各向异性机制的基础。

膨胀土的裂隙面和软弱层严重地削弱了土体的抗剪强度，对于通过膨胀土地区的引水渠道来说，它也就必然是控制渠道边坡稳定性的关键因素。

同时，分析和阐明了膨胀土的六种微结构类型并指出了南阳膨胀土的主要微结构特征。

2. 膨胀土变形与强度特性的测定与评述

在本书中，报道了采用不同于一般常规方法的试验技术和概念对膨胀土的变形与强度进行研究的一系列结果。例如不同初始应力条件下膨胀土湿化后的应力、应变与强度的变化规律、膨胀土在不同含水量时的本构关系等。还介绍了采用大量的现场大剪试验、反复胀缩疲劳试验、载荷试验、旁压试验与静力触探等方法，以及相应的室内试验（其中包括动力强度试验、反复荷载作用下的强度测定和流变试验以及吸力测定等）获得的各类软弱面抗剪强度、粗颗粒含量与强度关系等大量有实际应用价值的数据和相关分析成果。

目 录

第一章 膨胀土的结构特征	1
一、膨胀土的宏观结构特征	1
二、膨胀土的微观结构特征	4
三、膨胀土的颗粒组成	6
四、膨胀土的矿物化学成分	8
五、膨胀土结构特征研究方向	12
第二章 膨胀土的基本工程性质	15
一、膨胀土的胀缩特性	15
二、膨胀速度	24
三、反复胀缩效应	24
四、胀缩各向异性	25
五、膨胀土的渗透性与崩解性	27
六、膨胀土的压缩性	28
第三章 膨胀土的抗剪强度特性	31
一、膨胀土强度的尺寸效应	31
二、击实膨胀土及混合土的强度	38
三、特殊条件下膨胀土的抗剪强度	40
四、影响膨胀土抗剪强度的因素分析	45
五、膨胀土抗剪强度取值讨论	51
第四章 膨胀土工程性质的原位测试	58
一、旁压试验	58
二、静力触探试验	61
三、动力触探试验	63
四、现场大剪试验	64
五、载荷试验	66
六、吸力试验	71
第五章 膨胀土的判别与分类	78
一、膨胀土的判别原则与指标选择	78
二、膨胀土分类的研究现状	80
三、膨胀土分类依据及特征分析	84
四、膨胀土分类的工程意义	88
五、模糊数学在膨胀土分类中应用	90
第六章 膨胀土膨胀机理的理论研究	94
一、现有几种主要理论概述	96
二、膨胀土工程结构系统理论	108

三、膨胀土的膨胀软化方程..... 116

四、膨胀土浸水变形的数学模式..... 118

五、膨胀土粘弹塑性方程..... 125

六、膨胀土的体变理论..... 130

第七章 膨胀土环境中的水工建筑物设计..... 134

一、膨胀土渠坡设计与力学分析..... 134

二、灰色理论在渠坡优化设计中的应用探讨..... 140

三、膨胀土地基建筑物设计..... 149

四、膨胀土坝的设计..... 155

五、膨胀岩土中的洞室问题..... 162

第八章 膨胀土渠坡稳定性有限元分析 173

一、地质模式与数学模型..... 173

二、膨胀土的非线性分析..... 175

三、非线性分析结果与实测比较..... 179

四、不同条件下有限元的计算结果与分析..... 183

五、离心模型试验与有限元计算..... 194

六、膨胀土渠坡非线性分析的研究和发展趋向..... 202

第九章 膨胀土水工建筑物的原型监测..... 205

一、监测系统工程设计..... 205

二、监测技术手段..... 207

三、膨胀土边坡监测成果分析..... 208

四、膨胀土边坡破坏机理探讨..... 219

五、膨胀土滑坡预报..... 223

第十章 水利工程膨胀土的处理方法..... 228

一、换土..... 229

二、湿度控制..... 230

三、化学固化..... 232

四、土工织物..... 239

五、支挡结构..... 244

索引..... 254

第一章 膨胀土的结构特征

膨胀土的结构主要是指与其力学强度密切相关的宏观结构和微观结构特征，即土体中各种特定形态的地质界面，它包括物质分异软弱层面和不连续裂隙面、颗粒与粒团的排列与接触连结方式、微孔隙微裂隙，以及与结构有关的矿物化学成分、粒度成分等。这些结构特征有着自身的独特的形成过程和客观的发展历史，它是地质历史发展的产物，反映了成土地质环境与原始应力条件以及各种外力的改造作用。由于结构面的存在，使膨胀土产生了一系列独特的力学特性，而这些特性与结构面的成因类型，结构面的形状及其组合型式有关，也与结构面的充填物及其充填程度有关。同时结构特征还与矿物化学成分密切相连，而粘土矿物成分是决定其工程性质的重要物质基础，矿物成分以蒙脱石为主时，结构单元是两层二氧化硅和一层三氧化二铝组成，层间联结很弱，水分子可以渗入层间，生成水夹层，而产生晶内膨胀，加上蒙脱石一般又有较多的钠、钙阳离子，由于阳离子吸附作用，还产生粒间膨胀。伊利石的晶格与蒙脱石类似，但晶包之间结合的不是水，而是正价钾离子 (K^+)，故伊利石的晶架结构比较牢固，浸水时，产生粒间膨胀，这种膨胀比蒙脱石的晶内膨胀弱得多。高岭石，由于矿物晶架联结牢固，一般很少有交换能力的阳离子，因此，其浸水后，膨胀性很弱。正如有些工程的资料表明，在高塑性膨胀土的自然边坡滑动和挖方工程的滑坡，都是与滑动面的粘土本身含有较多的蒙脱石矿物成分密切相关，而且不同的矿物具有不同的结构特征。

一、膨胀土的宏观结构特征

1. 结构面成因类型

结构面按其成因可分为原生结构面、次生结构面和构造面三种。

(1) 原生结构面，是指在成土过程中形成的结构面。它是由于温度、湿度和压密等作用以及由不均匀胀缩效应引起的体积变化和土内复杂的物理化学—力学效应的结果。显然，土体中产生的不均匀应力对导致结构面的形成起了主要的作用。这类结构面包括沉积层理、不整合面、裂隙等，其中大多为隐蔽微裂隙。

(2) 次生结构面，是指土体受卸荷作用、风化作用和地下水活动所产生的结构面，一般由原生结构面发展而成，如卸荷裂隙、风化裂隙以及软弱层面等，其形成条件和空间分布情况大致如下：

(a) 卸荷裂隙是由于土体中应力释放和调整而造成的。比如膨胀土渠道开挖卸荷，使原来处于地层深部的土体应力释放而产生膨胀回弹效应，伴随着裂隙的发展。这种裂隙常见于膨胀土开挖边坡地段和近代深切河谷的两岸陡坡上。

(b) 风化裂隙是膨胀土在温度和渗流水等因素的作用下，经频繁而往复的胀缩循环，使土的体积产生周期性变化，进而使原生裂隙逐渐显露而张开，使宽度逐渐扩大，形成了较长大的贯通裂隙。在渠道开挖过程中，观测到近地表裂隙密度较大，常呈网状。

(c) 软弱层一般是不同时代的土层，由于沉积环境的差异，以及后期风化营力的改造和渗流水等的作用下，使其软化形成了层间软弱层带。该类软弱层延伸规模较大，长达数百米。如受后期构造运动影响形成缓倾斜产状，则其条件对工程更为不利。南阳膨胀土的软弱层主要展布在中更新统棕黄色膨胀土与上更新统灰褐色粘土接触面处。

(3) 构造结构面，是指土体中构造应力场作用所产生的破裂面或断层。比如南阳陶岔第四纪断裂和厚坡一半店第四纪断裂所形成的构造结构面。至于光滑而常见擦痕的层间软弱层面的成因与新构造运动的剪应力的关系有待研究。

2. 结构面的特性

膨胀土中软弱结构面多数是后期各种风化营力对原生结构面的改造结果。从工程角度考虑，着重分析次生结构面中的裂隙和软弱层面的特征及力学效应。因为次生结构面中多充填灰白色粘土，其强度都接近于两侧土体的残余强度，渠道边坡的稳定直接取决于该类结构面的组合形式和结构特性。当软弱结构面的组合形态对渠坡的稳定不利时，例如主要结构面的倾向与边坡同向，其倾角等于或小于边坡坡度时，则边坡常沿软弱结构面产生规模不等的滑坡而丧失稳定。

(1) 裂隙，无论何种成因类型的膨胀土，都是由两组以上的裂隙组合而成的裂隙结构体。根据南阳膨胀土的裂隙调查研究资料，有的成层状结构，有的成网状结构，纵横交错。裂隙多为灰白色粘土充填，厚一般为1~3mm，最大20mm。由胀缩效应引起的张力应变形成的陡倾角裂隙，裂面粗糙，胀缩效应所形成的水平应力差产生的缓倾角裂隙，裂面具腊状光泽，常见镜面擦痕。

(2) 缓倾角软弱层，软弱层倾角一般6°~10°，底部层面极光滑，具腊状光泽，充填连续灰白色粘土，厚1~10mm，非常细腻稀软；上部充填草黄色粘土，裂隙很发育，一般厚度1~4mm，最厚达20cm。软弱层内物质的粘粒含量高达60%以上，液限最大达到64%，粘土矿物成分以蒙脱石为主。典型的如南水北调中线陶岔中更新统棕黄色膨胀土与上更新统灰褐色粘土接触面（见图1-1）。这类软弱层对渠坡稳定性影响极为严重，是构成滑坡的主要内在因素，比如陶岔渠首和浙川香花灌渠的大规模滑坡均由该类软弱层引起。

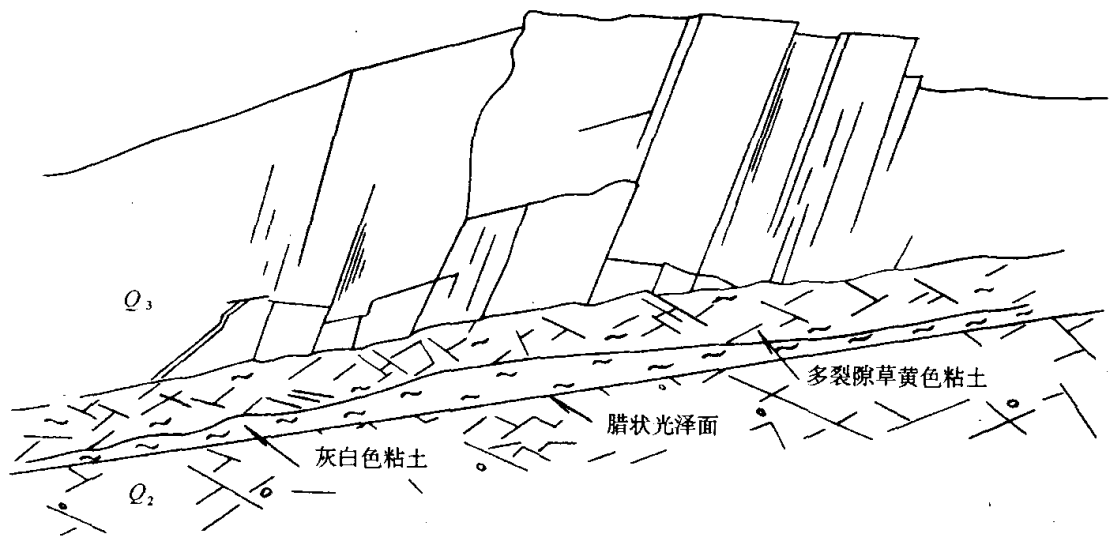


图 1-1 缓倾角软弱层面

影响结构面力学效应的因素，除了与灰白色粘土充填厚度有关之外，还与结构面的形

态特征密切相关。常见裂隙结构面形态有不规则的波状起伏曲面与平直面。当剪切沿波状起伏曲面发生时，结构面的力学效应就与起伏度的大小有关。但是，在实际水利工程中，这种起伏度的力学效应难以测定和利用。沿平直结构面的剪切强度低于沿起伏结构面的数值，然而，结构面的力学强度还与粘土矿物成分、风化程度、含水量大小等密切相关。

上述结构面无论是张开或充填的，都为水分的迁移和湿胀干缩创造了条件，对渠坡稳定造成不利的影响，在软弱面上往往产生应力集中导致土体破坏。其强度均低于两侧土体强度，试验表明，对于无擦痕的裂隙面 $c=4\sim18\text{kPa}$ ， $\text{tg}\varphi=0.25\sim0.30$ ；对于光滑且有擦痕的缓倾角软弱面 $c=2\sim13\text{kPa}$ 、 $\text{tg}\varphi=0.15\sim0.20$ 。Bjerrum 等人认为张开裂隙 $c=0$ ， $\varphi=0$ ；闭合光滑裂隙 $c=0$ ， $\varphi=\varphi_r$ （土块残余强度）；闭合粗糙裂隙 $\varphi=\varphi_p$ （土块峰值强度）。

3. 不同成因类型膨胀土的结构特点

膨胀土以沉积建造环境和母岩风化改造作用为分类依据，大体上可分为五种成因类型：即湖相沉积膨胀土，河流相沉积膨胀土（冲积膨胀土、洪积膨胀土、冰水沉积膨胀土），残坡积膨胀土，海相沉积膨胀土以及火山灰沉积膨胀土。各种类型的膨胀土由于物质来源于不同的母岩和成土环境的差异，因而具有不同的物质成分和特定形态的裂隙结构面，如图 1-2，并具有分带性与分区性。这里以南阳和邯郸膨胀土为例说明结构面与成因的关系。

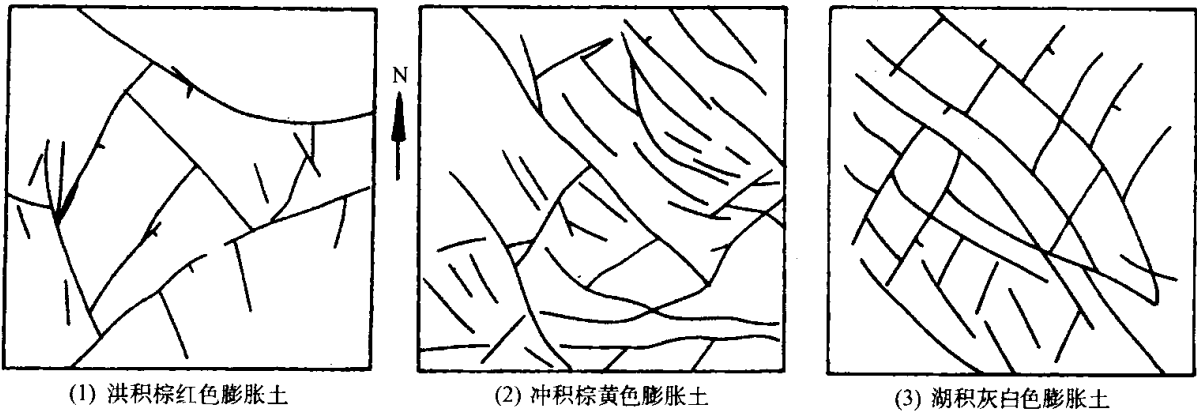


图 1-2 不同类型膨胀土的裂隙分布特征

(1) 洪积膨胀土：棕红色粘土与礞石成互层，局部夹有灰白色粘土透镜体。粘土结构致密，失水轻微干裂，裂隙不发育，粘土矿物成分以伊利石为主。含有蒙脱石和高岭石。透镜状灰白色粘土网状裂隙发育，蒙脱石含量达 35% 以上。

(2) 冲积膨胀土：棕黄或红黄色粘土，局部地段夹有灰白色粘土透镜体。含钙质结核和铁锰质结核，钙质结核粒径 0.5~20cm 不等，一般占 5%~15%，局部高达 45%，有时富集形成钙盘。土体裂隙发育，倾向以北东为主，局部地段呈随机性变化，多数倾角 40°~50°，部分 10°~30°。裂隙面光滑，见清晰擦痕，大多充填灰白色粘土条带或薄膜。粘粒含量为 40%~65%，粘土矿物成分以伊利石为主，含相当数量蒙脱石。灰白色粘土透镜体厚 0.5~5m，粘土矿物中蒙脱石含量高达 55%。

(3) 湖相沉积膨胀土：南阳地区为褐黄夹灰褐色或灰绿色粘性土，部分含铁锰结核与风化钙质结核，土体裂隙短小，局部见有清晰层理与多层次。粘粒含量 35%~54%，粘土矿物成分以伊利石为主，并含有少量高岭石与蒙脱石。灰褐色粘土局部含有机质，天然含水量较高，为 24%~26%。在局部地段灰褐色粘土层之底部与中更新统地层接触面处，常

有一薄层灰白色粘土，厚数毫米至数十毫米，主要粘土矿物为蒙脱石。邯郸地区为灰绿或灰白色粘土，厚度较大，具微细层理，裂隙延伸较长，裂面呈蜡状光泽。

(4) 冰水沉积膨胀土：棕黄夹灰白色粘土，网状裂隙较发育，裂面充填有灰白色粘土条带，其中还嵌有小卵石风化而成的杂色粘土，显斑状结构。

(5) 残坡积膨胀土：一般由粘性土夹少数岩石碎屑组成。多由泥灰岩、粘土岩、花岗岩，玄武岩，碳酸盐类岩石残积风化壳形成。风化壳具明显分带性，由上而下为残积土，全风化、强风化、弱风化。因此，土中碎屑成分也依母岩而定，大小不一，数量不等。

由泥灰岩与粘土岩风化的灰白、灰绿色粘土表现为土体裂隙很发育，裂隙倾角约 30° ，裂隙长达十余米。粘粒含量一般大于 50%，粘土矿物成分主要为蒙脱石，其次是伊利石和高岭石。由花岗岩风化形成的膨胀土，结构较松散，含有棱角石英砂，粘粒含量一般在 40%~45%，短小的网状裂隙较多。由碳酸盐类岩风化形成的棕红色膨胀土含有较多钙质与铁锰质，粘土矿物成分以伊利石为主，土体裂隙不发育。

据国外资料分析，膨胀土的结构特征随成因类型而有变化。如印度黑棉土由玄武岩类经风化和侵蚀后的残积物，一部分经水流搬运到平原冲积而成，一部分物质则残留在高原或山地形成残积土，两者的结构特征有差异。意大利的膨胀土多数为火山喷出岩的蚀变产物。加纳的膨胀斑纹土由阿拉克页岩风化物残积而成。美国的膨胀土是由页岩与粘土岩风化产物残积或冲积而成。南非膨胀土由基性火成岩与厄卡页岩风化产物冲积或湖相沉积而成。这些不同母岩与不同成因类型的膨胀土，由于沉积条件不同，通常具有层状的或是块状的宏观构造。层状的构造有厚层的、薄层的、带状的、微层理的、隐层理的等等。块状的构造一般为无层理的、杂乱的、无规则的等等。层状构造是由不同成分的土层交替沉积而成，是冲积、湖积等沉积物的特征。块状构造是一切陆相堆积—坡积、洪积、冰积等土体的特征。因此，研究膨胀土结构特征的同时要研究膨胀土的物质材料来源，沉积地质环境，形成与演变条件。

二、膨胀土的微观结构特征

膨胀土的微观结构是指土在一定地质环境和条件下，土粒和粒团的排列方式，微孔隙与微裂隙的大小、形状、数量及其空间分布与充填情况，接触与连结方式等所构成的微结构特征。也有的研究者认为包括粘土及碎屑物质在微结构中相互关系，结构单元在空间上的定向情况，单元体之间的接触连接类型，结构致密程度，孔隙空间特征等。近年来，人们愈来愈重视膨胀土微观结构的研究，试验研究表明，微结构也是决定和影响土的工程性质的极其重要的因素，在土的天然结构不受扰动的前提下，膨胀土的膨胀与收缩特性，强度特性以及变形性质，在很大的程度上取决于膨胀土的原始结构特征。因此，微观结构也是膨胀土的重要质量特征之一，它一方面反映膨胀土形成条件，另一方面也是决定膨胀土物理力学以及其它性质的重要因素。在微结构研究中应充分运用成岩作用理论，这是认识膨胀土强度形成机理的基础。

1. 膨胀土的微结构类型

(1) 絮凝结构，其基本单元主要为扁平状聚集体和片状颗粒，它们以边—面接触为主，边—边和面—面接触为辅构成。在这种结构中，扁平状和片状颗粒无明显的定向优势。

(2) 层流结构，即定向排列结构，其基本结构单元为片状和叠片状颗粒。它们以面—面接触为主构成的高度定向排列结构。在光滑裂隙面上常可见到厚约1.0mm的高度定向排列薄层，土体中有时也可看到这种局部高度定向排列结构。

(3) 紊流结构，其结构单元也以片状和扁平状颗粒为主，含有粒状颗粒，它们之间形成似山洞小溪流水似的结构。从总体来看，片状、扁平状颗粒有一定的定向趋势。

(4) 粒状堆积结构，基本结构单元主要为聚集体和单粒体，它们存在于以高岭石为主或含石英杂质的土中。

(5) 胶粘式结构，其结构单元可以是单粒体和团粒体，也可以是片状体和叠片体，它们之间可以以各种形式接触，然后，被一层糊状物所包裹，单元体有明确的边界和清晰的轮廓。

(6) 复合式结构，对于大多数的膨胀土来说，不可能仅有某一种结构特征，而往往是各种结构的综合，如叠片体的絮凝结构中嵌入粒状颗粒后则形成了复式结构。

2. 膨胀土的主要微结构特征

膨胀土的微结构特征随母岩与地质成因不同而各异。泥岩形成的残积膨胀土，其微层理及沿层面微裂隙发育，扁平长条形矿物团聚体沿层面平行排列。灰岩形成的残积膨胀土，多数集聚体排列无序，集聚体内部排列紧密，而集聚体之间疏松多孔。冲积形成的膨胀土，颗粒一般呈鳞片状平行定向排列，其间发育定向拉长形孔隙。现将南水北调工程膨胀土的微结构特征叙述如下：

(1) 洪积形成的棕红色膨胀土，微裂隙较少，颗粒或粒团定向度低，一般属随机排列，如南阳海云寺棕红色膨胀土，微叠聚体群排列混乱，受粘粒矿物伊利石的影响叠聚体间相嵌较紧密，这种结构反映出土体的工程性质相对较好。

(2) 冲积形成的棕黄色膨胀土中粘土片或较小叠聚体，由于粘土矿物含量上的差异及无机胶体和无机盐的胶结集聚成较大的叠聚体，它们局部呈定向、半定向或随机排列。裂隙面上的灰白色粘土团粒呈定向条带，其平均定向度为35%。这种不同结构特征叠聚体将决定着膨胀土的胀缩性能及强度特性。南阳蒋庄灰白色膨胀土和棕黄色膨胀土中普遍发育着微孔隙与微裂隙，无论在叠聚体或叠集聚体间，都分布有各种大小不同，形状各异的微孔隙与微裂隙，尤其是微裂隙，它是构成膨胀土特有的微结构特征的重要组成部分，微孔隙与微裂隙的存在有利于水的渗入与排出，为叠聚体的胀缩创造水分迁移变化的必要条件，这直接影响膨胀土的工程性质。

(3) 湖积形成的灰褐色膨胀土及部分棕黄色膨胀土颗粒定向度较低，多数呈随机排列，并富含铁锰结核。但是，在土体滑动带的主滑面上，膨胀土颗粒具较好的定向排列。而灰白色膨胀土中粘土片为鳞片状，有的略带曲面，大多呈面—面和边—面，密集或架空—密集排列定向较好的叠聚体。叠聚体普遍发育微裂隙及晶间孔隙，有些孔隙达 $3\mu\text{m}$ ，孔隙率25%~35%。

(4) 残积膨胀土，由花岗岩风化形成的灰白色残积土，如南阳安皋膨胀土，其结构松散，富含石英、长石等矿物碎屑，土粒随机排列；泥灰岩风化形成的灰白色残积土，如辉县、汤阴的膨胀土，含蒙脱石、伊利石等，粘土矿物形成晶间孔隙或孔洞，有时呈卷曲状，蒙脱石组成孔洞约 $5\mu\text{m}$ ，孔隙率达32%；粘土岩风化形成的灰绿色或棕红色膨胀土，如鲁山膨胀土，蒙脱石呈卷曲状，微孔洞及微裂隙发育，粒间孔隙率约占30%。

综上所述，粘土矿物实际上是叠聚体来影响粘性土工程性质的。不同矿物叠聚体的形状、大小和特性是不同的。高岭土叠聚体中的薄片排列整齐、紧密，基本上保持矿物晶形特征，叠片间连结比较牢固稳定。蒙脱石叠片间斥力较大，吸引力较弱，结构连结不牢固，是一种易变的叠聚体，在剪应力作用下，易发生变形和破坏，抗剪强度低。因此，研究膨胀土微结构特征，不仅具有理论意义，而且有着工程实用价值。

不同矿物形成的不同片状叠聚体以及裂隙定向使得膨胀土本身及其产生的力学效应，诸如膨胀、收缩以及应力等呈现各向异性，而且矿物的定向排列程度与力学强度密切相关，例如丹江口膨胀土在剪切带内及带上侧、下侧的定向度分别为71%、13%、14%，相应的内摩擦角 φ 值分别为7.9°、16.7°、16.7°。

膨胀土的结构特征还使得膨胀土的膨胀从其机制来说有着性质截然不同而又难以明确分开的两种膨胀，一是矿物成分导致的膨胀；二是结构特征在应力作用下发生运动而产生的膨胀，这两种膨胀也可能混合地同时发生。

三、膨胀土的颗粒组成

我国膨胀土粒度成分的特点是粘粒含量高，一般超过44%，最高达81%，常属高分散性土，如表1-1所示。

我国部分水利工程膨胀土颗粒成分 表 1-1

序号	工程名称	地 区	粒 级 含 量 (%)			
			>0.05mm	0.05~0.005mm	<0.005mm	<0.002mm
1	新汴河排洪渠	安徽宿州	10	46	44	26
2	高级渠	河北邯郸	11	39	50	30
3	南湾灌渠	河南信阳	7	40	53	32
4	漳河总干渠	湖北荆门	8	47	45	37
5	东风灌渠	四川成都	6	44	50	40
6	那板干渠	广西上思	7	35	58	42
7	南盛引水渠	广东茂名	7	46	47	28
8	西大沟引水渠	云南蒙自	3	40	57	38
9	花溪水库	贵州贵阳	9	30	61	36
10	引嫩工程	黑龙江富裕	7	32	61	37
11	引丹五干渠	湖北襄樊	5	50	45	28
12	岳城水库	河北磁县	6	27	67	41
13	张沟水库	河南邓州	5	32	63	46
14	靳庄水库	河南南阳	7	42	51	42
15	明钦水库	湖北竹山	4	39	57	55
16	那支水库	广西南宁	2	17	81	65

南水北调中线南阳膨胀土颗粒组成以粒径小于0.05mm的细颗粒主，并含有少量的石英、长石、云母、方解石等碎屑颗粒。从表 1-2 可以清楚地看出，各种成因类型的膨胀土中小于0.005mm粘粒所占比重都较大，一般为 38%~57%，最高为 64%，其中小于0.002mm颗粒含量一般在 20%~32%，最高为 43%；0.05~0.005mm粉粒含量一般为 34%~52%；大于0.05mm砂粒含量一般 6%~12%。但花岗岩风化的膨胀土，砂粒含量高，平均为 22.5%。

南阳膨胀土颗粒成分 表 1-2

成因类型	土 名	粒 级 含 量 (%)			
		>0.05mm	0.05~0.005mm	<0.005mm	<0.002mm
残积	灰白色膨胀土 (泥灰岩风化)	$\frac{11.8}{2\sim21}$	$\frac{35.5}{23\sim47}$	$\frac{52.7}{47\sim64}$	$\frac{27.2}{20\sim34}$
	灰白色膨胀土 (花岗岩风化)	$\frac{22.5}{20\sim25}$	$\frac{36.5}{33\sim40}$	$\frac{41.0}{40\sim42}$	$\frac{20.0}{14\sim26}$
湖积	灰褐色膨胀土	$\frac{10.3}{5\sim16}$	$\frac{51.0}{43\sim57}$	$\frac{38.7}{35\sim54}$	$\frac{23.4}{16\sim29}$
冲积	棕黄色膨胀土	$\frac{6.0}{1\sim15}$	$\frac{49.6}{38\sim59}$	$\frac{44.4}{38\sim55}$	$\frac{25.5}{22\sim39}$
	灰白色膨胀土	$\frac{8.3}{6\sim12}$	$\frac{34.3}{30\sim47}$	$\frac{57.4}{48\sim64}$	$\frac{31.7}{24\sim43}$
洪积	红色膨胀土	$\frac{10.7}{2\sim22}$	$\frac{44.5}{31\sim47}$	$\frac{44.8}{36\sim53}$	$\frac{23.7}{14\sim30}$
	灰白色膨胀土	$\frac{8.0}{2\sim12}$	$\frac{43.7}{42\sim46}$	$\frac{48.3}{40\sim55}$	$\frac{30.0}{26\sim34}$

注：表中横线以上为平均值，横线以下为范围值。

膨胀土颗粒成分大致有如下特点：

- (1) 膨胀土颗粒成分以粘粒为主，其中小于0.002mm粒级占有相当大比例，说明具有较多的高分散性矿物，如蒙脱石等，这与粘土矿物成分鉴定结果是一致的。
- (2) 对不同成因类型和不同母岩形成的膨胀土来说，由于颗粒搬运，分选与沉积环境以及母岩性质与风化程度等的差别，因而颗粒组成也相差较大。比如河流冲积成因的膨胀土，其颗粒组成与搬运距离有关，搬运距离愈远分选性愈好，颗粒愈细，故粘粒含量集中，粉粒和砂粒含量减少。如南阳盆地膨胀土粒级从北向南逐渐变细，具有水平方向的变化规律。在残积膨胀土中，泥灰岩风化膨胀土的粘粒含量相对较高，达 64%，花岗岩风化膨胀土含一定石英颗粒，高达 25%，两者在垂直方向从上而下颗粒逐渐变粗。
- (3) 同种成因类型膨胀土粘粒含量也有较大的区别。如南阳冲积成因的灰白色膨胀土，其粘粒与胶粒含量最高，粘粒高达 64%，胶粒占 43%。因此，膨胀性能强，力学强度低。膨胀土中的粘粒具有较强的胶体化学性质，粘粒含量愈多，比表面积愈大，使膨胀土具有液限高，膨胀性大的特性。当土中含水量较小时，水膜变薄，颗粒间的吸力加大，使膨胀土具有较高的强度。若土中含水量很高时，吸附在粘粒周围的水膜变厚，其强度就显著降低，压缩性增大。因此，膨胀土中粘粒含量愈多，亲水愈强，工程性质就愈差。

四、膨胀土的矿物化学成分

膨胀土的特殊工程性质是受其特殊的矿物化学成分控制的。研究膨胀土矿物化学成分不仅对了解控制膨胀土工程性质的内在因素，探讨其膨胀机理所必须，而且对膨胀土性质改良和加固，以及探讨对膨胀土研究的新技术和新方法也是必不可少的。

1. 矿物成分

膨胀土的矿物成分包括粘土矿物和碎屑矿物，碎屑矿物中大部分为石英、斜长石和云母（主要是水云母），其次为方解石和石膏等矿物。碎屑矿物是粗粒部分的主要组成物质，一般来说，粗粒在膨胀土中含量有限，故对其胀缩性质影响不大。而影响膨胀土工程性质主要是细粒部分的粘土矿物，特别是蒙脱石类矿物，例如我国红粘土的粘粒含量都很高，但胀缩性能完全不同。陕西第三系三趾马红土主要粘土矿物成分为蒙脱石、伊利石，蒙伊混层矿物含量占70%左右，它的自由膨胀率(δ_{ef})高达160%，膨胀力最高达1.8MPa，具有很强的膨胀性。而江西万安第三系红层残积红土的粘土矿物以高岭石为主，伊利石占25%左右，其自由膨胀率在40%左右，膨胀力一般小于30kPa，胀缩性能很弱。

国内外对膨胀土粘土矿物成分的研究曾作了不少工作，表1-3、表1-4 列出部分地区膨胀土的矿物成分。

我国部分地区膨胀土主要矿物成分 表 1-3

地 区	矿 物 成 分	鉴 定 方 法
云南 曲靖、茨营	水云母为主，多水高岭石次之，含少量绿泥石	X 射线衍射，差热分析
贵州 贵阳、安顺、铜仁、遵义	主要为绿泥石、伊利石和高岭石，有些含少量蒙脱石 伊利石、蒙脱石，或高岭石、伊利石	X 射线衍射，差热分析 电镜扫描 X 射线衍射，电镜扫描
四川 成都	主要为伊利石，次为蒙脱石，含少量高岭石和石英	X 射线衍射，差热分析，电镜扫描
广西 南宁 宁明 贵县	伊利石 71%~96%，多水高岭石 14%，石英 1%~7% 伊利石 58%~61%，高岭石+绿泥石 29%~33%，蒙脱石 7%~13% 高岭石、蒙脱石或蒙脱石—伊利石混合层，伊利石为主，含绿泥石	电镜扫描 X 射线衍射，差热分析， 电镜扫描，红外光谱 X 射线衍射，电镜扫描
陕西 安康 汉中、西乡	蒙脱石为主，伊利石次之 伊利石为主，含少量高岭石、蒙脱石	X 射线衍射，差热分析， 电镜扫描，染色 X 射线衍射，差热分析
湖北 郧县、十堰 枝城 当阳 荆门	伊利石、含少量或极少量高岭石、蒙脱石 蒙脱石—多水高岭石，少量针铁矿 伊利石 22%~55%，高岭石 32%~57%，蒙脱石 8%~16%	X 射线衍射，差热分析 X 射线衍线，差热分析 X 射线衍射，差热分析，电镜扫描
河南 平顶山 宝丰，鲁山	蒙脱石为主，含伊利石、高岭石 伊利石为主，次为蒙脱石和含蒙脱石晶层的有序层间矿物	X 射线衍射，差热分析 X 射线衍线，差热分析
安徽 合肥、泗县	伊利石为主，含蒙脱石、蛭石、石英、褐铁矿	X 射线衍射，差热分析，电镜扫描
山东 泰安 临沂	蛭石、伊利石、蒙脱石和高岭石 伊利石，含少量蒙脱石、高岭石	X 射线衍射，差热分析 X 射线衍射，差热分析，红外光谱
山西 榆次、红崖	伊利石为主，含少量高岭石	X 射线衍射，差热分析

世界部分地区膨胀土主要矿物成分

表 1-4

地 区	矿 物 成 分	鉴 定 方 法
柬埔寨	蒙脱石、伊利石为主，次为高岭石、石英和碳酸盐	差热分析
日本	蒙脱石、绢云母、氯化物与混合层矿物等	X 射线衍射
印度	蒙脱石 10%~80%，伊利石 10%~75%，拜来石 2%~15%	X 射线衍射
以色列	蒙脱石 40%~80%，高岭石 2%~10%，石英 10%~20%，长石 5%	X 射线衍射，差热分析
加纳 阿克拉	高岭石 63%，石英 33%，水云母 4%和微量氧化铁	X 射线衍射
罗马尼亚	蒙脱石 40%~80%，伊利石 20%~60%	X 射线衍射
俄罗斯	伊利石和蒙脱石为主，含少量高岭石和其它矿物	差热分析
美国	蒙脱石，有的含量达 45%~90%	X 射线衍射，差热分析
加拿大西部	蒙脱石为主，含有伊利石	差热分析
澳大利亚	伊利石为主，含蒙脱石	X 射线衍射，差热分析

近年来我国大型水利工程的膨胀土研究中，也非常注意粘土矿物成分，例如南水北调中线工程膨胀土的粘土矿物成分通过 X—射线衍射，差热分析和电子显微镜鉴定，主要膨胀土的粘土矿物成分列于表 1-5 中。可以看出，灰白色膨胀粘土矿物以蒙脱石为主，占 33%~55%，平均含量为 44%，伊利石 5%~13%，并含 5%~8%高岭石。棕黄色膨胀土粘土矿物成分以伊利石为主，占 31%~35%，蒙脱石占 16%~22%，高岭石占 8%左右。灰褐色膨胀土粘土矿物中伊利石含量为 17%~32%，蒙脱石为 15%~17%，高岭石为 8%~10%。但是，在各地段膨胀土中，不同类型粘土矿物所占比例及其组合形式各有差异，这是由于各地区在成土过程中，母岩的堆积环境以及风化改造程度等方面的差异所形成的。

南水北调中线工程膨胀土粘土矿物成分

表 1-5

土 名	成 因	地 点	粘土矿物成分 (%)	鉴 定 方 法
灰白色膨胀土	泥灰岩风化	镇平	蒙 ₃₃ 伊 ₁₀ 高 ₈	X 射线衍射、差热分析、电镜扫描
	花岗岩风化	南阳安皋	蒙 ₄₆ 伊 ₅ 高 ₅	X 射线衍射、差热分析、电镜扫描
	冲 积	南阳十八里岗	蒙 ₄₂₋₅₅ 伊 ₅₋₁₃ 高 ₆	X 射线衍射、差热分析、电镜扫描
	洪 积	南阳九重	蒙 ₄₃ 伊 ₇ 高 ₆	X 射线衍射、电镜扫描
棕黄色膨胀土	冲 积	南阳构林	伊 ₃₁ 蒙 ₁₆ 高 ₈	X 射线衍射、差热分析、电镜扫描
		南阳圣杯楞	伊 ₃₁ 蒙 ₂₂ 高 ₅	X 射线衍射、电镜扫描
灰褐色膨胀土	湖 积	南阳槐树湾	伊 ₁₇ 蒙 ₁₇ 高 ₁₀	X 射线衍射、电镜扫描
		南阳十林	伊 ₃₂ 蒙 ₁₅ 高 ₈	X 射线衍射、差热分析
灰绿色膨胀土	粘土岩风化	鲁山八里岭	蒙 ₄₂ 伊 ₁₆ 高 ₅	X 射线衍射、差热分析、电镜扫描
		宝丰沃沟张	蒙 ₅₅ 伊 ₇ 高 ₃	X 射线衍射、差热分析、电镜扫描
		邯郸南城东南	蒙 ₃₂ 伊 ₈ 高 ₁₂	X 射线衍射、差热分析、电镜扫描
棕红色膨胀土	粘土岩风化	邯郸南城北	蒙 ₁₇ 高 ₁₅ 伊 ₇	X 射线衍射、差热分析、电镜扫描
棕黄色膨胀土	冰水沉积	邢台兰羊村	蒙 ₃₄ 伊 ₇ 高 ₁₀	X 射线衍射、差热分析、电镜扫描

注：蒙₃₃伊₁₀高₈系指蒙脱石含量 33%，伊利石 10%，高岭石 8%。

2. 化学成分

以南水北调中线南阳膨胀土的化学成分为例（表 1-6），分析结果可得出如下结论：

南阳膨胀土化学成分

表 1-6

粒级范围	土 名	时代	成 因	化 学 成 分 平 均 含 量 (%)							$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	
小于 2 μm 颗粒	灰白色膨胀土	Q	泥灰岩风化	55.16	19.50	7.23	0.28	4.69	2.03	0.13	4.80
			花岗岩风化	54.17	23.56	7.91	0.33	2.16	1.30	0.88	3.95
		Q ₂	冲积	55.62	22.21	7.76	0.28	2.21	1.76	0.14	4.23
		Q ₁	洪积	55.00	22.89	6.02	0.27	2.67	1.87	0.14	4.08
	棕黄色膨胀土	Q ₂	冲积	52.95	24.79	7.09	0.34	2.05	2.46	0.91	3.62
	灰褐色膨胀土	Q ₃	湖积	51.91	24.78	7.16	0.40	2.09	2.34	0.22	3.55
全部土粒	灰白色膨胀土	Q	泥灰岩风化	59.22	15.92	3.49	2.80	0.63	1.56	0.42	6.32
		Q ₂	花岗岩风化	66.97	14.42	3.27	1.48	0.69	2.66	0.76	7.85
		Q ₁	冲积	64.89	14.63	7.40	1.04	1.12	0.85	0.14	7.50
		Q ₂	洪积	60.35	13.91	4.50	1.02	0.81	1.95	0.34	7.34
	棕黄色膨胀土	Q ₂	冲积	63.69	15.36	5.80	1.04	0.86	1.93	0.73	7.02

(1) 膨胀土的化学成分含量虽有差异，但主要是 SiO₂，Al₂O₃，Fe₂O₃，三种氧化物总量为 81%~86%。对比胶粒与全粘土的化学成分，在全部土粒中 SiO₂ 的含量提高，Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 则相对减少。这一现象表明，在粗颗粒中石英矿物相对富集，而细小的粘土颗粒中铝硅酸盐粘土矿物相对富集。

(2) 在膨胀土的胶粒化学成分中，棕黄色膨胀土和灰褐色膨胀土的硅铝分子比率为 3.55~3.62。表明了矿物成分以伊利石为主。灰白色膨胀土硅铝分子比率一般大于 4.0，同鉴定结果粘土矿物成分以蒙脱石为主基本相符合。

(3) 在膨胀土的化学成份中，较活泼元素 K、Na、Ca、Mg 等碱金属和碱土金属含量普遍较高，表明它的风化淋滤程度有限，化学风化程度较低，只要气候，水介质与氧化—还原等环境条件发生改变时，还将进一步风化。例如伊利石脱钾转变为蛭石或蒙脱石，使膨胀土的亲水性增强，从而有可能使土体工程性质进一步恶化。

3. 阳离子交换量

膨胀土中离子交换吸附作用是粘土矿物的一种重要物理化学性质，测定膨胀土的阳离子交换性能可以定性地判明组成土的主要粘土矿物类型。从而也能评价土的亲水性、膨胀性和强度等重要性质的综合指标。南阳膨胀土的阳离子交换性能大体归纳于表 1-7 中，pH 值为 7.72~8.69。

可以看出，不同类型的膨胀土阳离子交换量和交换盐基成分的数值都有一定的差异。各类膨胀土交换阳离子成分为 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 等碱金属和碱土金属，其中交换主要成分是 Ca²⁺。灰白色膨胀土 Ca²⁺ 的含量在 30.40~50.53me/100g 之间，占交换性盐基总量的 66%~96%。其次为交换性的 Mg²⁺，含量在 1.23~12.00me/100g。交换性 K⁺ 和 Na⁺ 含量较少，仅有 0.18~2.02me/100g。

我国大部分地区膨胀土的阳离子交换量都在 20.38~43.79me/100g 之间，交换的盐基成分 Ca²⁺ 一般为 13.44~36.72me/100g，Mg²⁺ 一般为 1.28~10.56me/100g。比表面积在 142~459m²/g 之间。

南阳膨胀土离子交换性能

土 类	取 样 地 点	阳离子交换量 (me/100g)	盐 基 成 分 (me/100g)				
			K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	盐基总量
灰白色膨胀土	九 重	52.37	0.56	0.27	50.53	1.23	52.29
	安 皋	36.03	0.18	0.47	32.08	2.71	35.44
	十八里岗	47.73	1.49	0.97	36.72	3.43	42.61
	唐王桥	46.40	2.02	1.40	30.40	12.00	45.82
棕黄色膨胀土	十八里岗、构林	33.51	0.82	1.02	27.34	4.12	33.30
灰褐色膨胀土	槐树湾	28.03	0.28	0.30	18.19	7.12	25.89

4. 可溶盐与胶结物

根据试验资料，南阳膨胀土中的可溶性盐含量为2.18%~12.54%，包括易溶盐、中溶盐、难溶盐，主要成分为难溶盐，一般为2.16%，镇平灰白色膨胀土最大含量达12.44%。

膨胀土中胶结物质的分析方法是采用连二亚硫酸钠—重碳酸钠测定游离氧化硅、游离氧化铁、游离氧化铝与游离氧化锰。而对于无定形氧化铁测定是用草酸铵缓冲液提取，分析结果如表1-8。由表可见，膨胀土中的主要胶结物质为碳酸盐，而游离氧化硅及氧化铝的含量很低，若同汉江流域郧县的膨胀土胶结物质含量（游离氧化硅2.06%，游离氧化铁2.35%，游离氧化铝2.14%）相比较，相差很大。膨胀土中胶结物质的存在能增强膨胀土颗粒间的结构连结，形成一定的结构强度，一旦用EDAT—连二亚硫酸钠除去土中的游离氧化铁后，其细颗粒含量显著增加，膨胀性能增大，强度降低。鉴于胶结物质对强度的影响较大，故有必要对其进行试验研究。南阳膨胀土有机质含量较低，一般值为0.46%~0.99%。

南阳膨胀土胶结物质 表 1-8

土 名	取样地点	胶 结 物 质 (%)							
		游离 氧化硅	游离 氧化铁	无定形 氧化铁	游离 氧化铝	游离 氧化锰	易溶盐	碳酸盐	硫酸盐
灰白色膨胀土	镇平	0.19	0.03	0.05	0.14	0.01	0.08	12.44	0.02
灰白色膨胀土	十八里岗	0.20	0.04	0.05	0.15	0.00	0.08	2.15	0.07
棕黄色膨胀土	构林	0.21	0.06	0.08	0.14	0.01	0.08	2.28	0.02
灰褐色膨胀土	朱营	0.23	0.11	0.27	0.18	0.01	0.10	2.06	0.02
红色膨胀土	海云寺	0.20	0.06	0.08	0.15	0.00	0.08	11.00	0.02

蒙自泥灰岩风化壳的游离氧化物的分布具有如下规律性：

- (1) 游离 Al₂O₃ 的含量在垂直方向自上而下逐渐减少，如深度0.25m为8.0%，5.50m时仅0.6%；
- (2) 游离 Fe₂O₃ 的分布虽然在总体上具有与游离 Al₂O₃ 相近的上大下小的变化趋势，但是，在深度1.0~1.5m的富集带，深度1.0m 为16.8%，而在深度1.5m 处却为34.6%；
- (3) 游离 SiO₂ 含量不高，一般为1.0%~2.6%。而二氧化硅随深度增加逐渐增大，即

从近地表的 28% 向下增加到 47%，说明泥灰岩在垂直水流作用，经历了由碱性向酸性转化的过程；

(4) 剧、强风化带中除了游离 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 存在之外，尚有大量的结晶质赤铁矿、针铁矿等，这些物质不仅呈结核砂粒的形式构成土的骨架，而且还呈细分散结晶的形式构成粘土颗粒之间的胶结物或铁质薄膜，使土体增强强度，同时欠压密性；

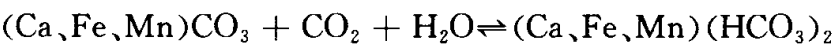
(5) 氧化钙的含量随深度增加逐渐增大，深度 0.25m、4.0m 处分别为 0.84%、2.0%，这表明水化水解作用的强度向深部减弱。

5. 膨胀土的结核

根据野外地质调查表明，无论何种成因类型的膨胀土或多或少含有一定数量的结核。这些结核大多组成膨胀土的粒状物质，一部分富集成层成为土中骨架，对膨胀土渠道边坡的稳定性起着重要的作用。因此，研究膨胀土中的结核及其含量有重要的工程意义。

膨胀土中的结核最常见的为钙质结核，其次铁锰质结核。它们是膨胀土中钙、铁、锰、碳酸盐富集的一种特殊形式，其生成是膨胀土在成土过程中地球化学作用的结果。它与一定地形、气候和地下水活动等条件有密切关系。

当含有 CO_2 的雨水或其他地表水渗入膨胀土中时，使得方解石等碳酸盐类矿物产生淋溶作用，并使碳酸盐以碳酸氢盐形式向下运移：



若地下水中 CO_2 含量愈多，溶解碳酸盐的能力则愈大。但当 CO_2 从水中逸出后，碳酸氢盐将逐渐地扩散和分散，并形成碳酸盐而沉淀，特别是沿土中裂隙方向有利于 CO_2 的排出时，则更易促成碳酸盐的沉淀。

在膨胀土中的氧化—还原界面上，由于存在着不同的氧化还原电位值，使其下部的铁锰被还原成 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} ，由于这些元素的低价化合物比高价化合物的溶解度要大，于是在水中的浓度较高，便逐渐向上部水中扩散，并被氧化而形成 Fe^{3+} 、 Mn^{3+} 的化合物而产生沉淀，形成铁锰结核。

南阳中更新统棕黄色膨胀土与下更新统红色膨胀土中，富含钙质结核（姜石）和铁锰结核。姜石形状各异，大小不等，一般粒径 2~20cm，小者数毫米。部分富集成层或呈透镜状，有时集中分布在裂隙或层面附近。在棕黄色膨胀土中，含量变化范围一般为 6%~40%。当含量超过 20% 时，则在膨胀土中起着骨架的作用，能提高土体的强度，从而会大大增强渠坡的稳定性。

五、膨胀土结构特征研究方向

1. 宏观结构研究方向

膨胀土在成土过程中由于温度、湿度、压密以及不均匀胀缩效应形成了许多网状交错裂隙和软弱结构面，使膨胀土产生了一系列独特的力学性质和各向异性的复杂介质，影响渠道工程的边坡稳定性。为此，目前重点研究下列问题：

(1) 裂隙组和软弱结构面的空间分布规律，以及形成的机理，包括地质沉积环境、地应力、重力作用与胀缩应力的研究。

(2) 结构面充填物性质及其力学效应，诸如对灰白色粘土充填厚度、结构面形态特征、