

公路膨胀土

处治理论与实践

GONGLU PENGZHANGTU CHUZH

LILUN YU SHIJIAN

刘大军 编著



中国大地出版社

公路膨胀土处治理论与实践

刘大军 编著

中国大地出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

公路膨胀土处治理论与实践 / 刘大军编著. —北京: 中国大地出版社, 2008. 10

ISBN 978-7-80246-144-4

I. 公… II. 刘… III. 公路路基—膨胀土—研究 IV. U416. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 170490 号

责任编辑: 赵 芳

出版发行: 中国大地出版社

社址邮编: 北京市海淀区学院路 31 号 100083

电 话: 010-82329127 (发行部) 82329120 (编辑部)

传 真: 010-82329024

网 址: www.chinalandpress.com 或 www.中国大地出版社.中国

印 刷: 北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本: 850mm × 1168mm 1/32

印 张: 5.875

字 数: 180 千字

版 次: 2008 年 10 月第 1 版

印 次: 2008 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 1—1000 册

书 号: ISBN 978-7-80246-144-4/F · 301

定 价: 22.00 元

版权所有 · 侵权必究

前 言

膨胀土的改性处理研究及应用是近几年公路、交通、水利、土建等工程领域大力发展的一个科目。尤其是随着国家加大对高速公路建设的投入，在膨胀土发达地区，研究满足路用要求的膨胀土改性处理及保证路基填筑质量的施工技术，既具有重大的理论意义，又具有巨大的经济效益和社会效益。

本书首先从膨胀土的组成和成分入手，详细研究了膨胀土在公路工程中表现的工程特性，参考国家标准，并结合大量实际工程案例，总结出了膨胀土的判别标准和判别方法；又通过大量的试验，深入研究了膨胀土改性处理机理，并对不同种类的膨胀土掺加不同比例的石灰进行改性处理，确定了膨胀土改性处理的方法及实际效果。在取得大量试验数据的基础上，通过分析，得出了不同种类膨胀土改性处理所需外加石灰的最佳比例参数范围，同时进一步确定了膨胀土改性处理的施工工艺和参数，提出了可直接指导施工的有效技术方法及注意事项，对以后高速公路建设准确地认清膨胀土，采取合理的改性处理方法，并有效地控制膨胀土，使膨胀土地区的公路建设达到优质高效的目的提供了实践依据。

通过对高速公路路基膨胀土填料改性处理的试验和应用的研究，有助于有效地改变膨胀土地区不能修筑高速公路的现实。江苏省宁靖盐高速公路的施工实践证明，通过对膨胀土的改性处理，达到了工程要求的工期和经济效益。膨胀土改性处理技术将具有广阔的应用前景。

作 者

2008 年 7 月

目 录

第 1 章 膨胀土的组成和分布	(1)
1.1 膨胀土的矿物组成	(1)
1.2 膨胀土的物理化学性质	(2)
1.3 膨胀土的分布和分类	(3)
1.3.1 膨胀土的分布	(3)
1.3.2 膨胀土的分类	(4)
1.4 膨胀土地质地貌	(5)
1.4.1 膨胀土的自然环境特征	(5)
1.4.2 膨胀土地裂	(7)
第 2 章 膨胀土的工程性质	(11)
2.1 土工试验	(11)
2.1.1 含水量试验	(11)
2.1.2 密度试验	(12)
2.1.3 界限含水量试验	(13)
2.1.4 固结试验	(15)
2.1.5 颗粒分析试验	(17)
2.1.6 无侧限抗压强度试验	(24)
2.1.7 膨胀量及 CBR 值试验	(25)
2.1.8 膨胀力试验	(31)
2.2 膨胀土的工程特性	(33)

2 公路膨胀土处治理论与实践 ❖

2.3 膨胀土在公路建设中的病害	(36)
2.3.1 引起膨胀土变化的因素	(36)
2.3.2 膨胀土地区公路工程常见病害类型	(39)
第3章 膨胀土的判别	(41)
3.1 膨胀土的判别依据	(41)
3.1.1 表征膨胀土胀缩特性的指标	(41)
3.1.2 膨胀土地基变形计算及分级	(42)
3.2 膨胀土的判别方法	(44)
3.2.1 自由膨胀率 (F_s) 判别方法	(44)
3.2.2 液限和塑限图判别法	(44)
3.2.3 模糊数学评判膨胀土	(45)
3.2.4 膨胀土胀缩等级的模糊灰元评价模型	(48)
3.3 典型红粘土与膨胀土的判别	(56)
第4章 膨胀土处理机理	(59)
4.1 膨胀土处理的历史和现状	(59)
4.2 膨胀土处理机理	(60)
4.2.1 膨胀土路基处理的一般方法	(60)
4.2.2 膨胀土处理方法选择	(63)
4.2.3 膨胀土改性处理中的问题	(64)
第5章 公路膨胀土路基处理技术	(68)
5.1 膨胀土路基沉降特性	(68)
5.1.1 荷载作用下膨胀土路基的沉降	(68)
5.1.2 膨胀土路基的胀缩沉降规律	(70)
5.1.3 膨胀土路基的工后沉降量问题	(75)
5.1.4 膨胀土的大气影响深度	(76)

5.2	膨胀土路基施工技术	(79)
5.2.1	材料	(80)
5.2.2	掺灰拌和	(80)
5.2.3	碾压成型	(82)
5.2.4	质量控制与检测	(82)
5.3	公路膨胀土处理技术要点	(84)
5.3.1	施工技术要点	(84)
5.3.2	存在的施工技术问题	(85)
5.4	改性处理技术的应用	(86)
5.4.1	原土性质检测	(86)
5.4.2	掺灰改性	(91)
第6章	膨胀土边坡防护技术	(102)
6.1	膨胀土边坡破坏原因和特征	(102)
6.1.1	膨胀土边坡破坏原因	(102)
6.1.2	膨胀土边坡破坏特征	(103)
6.1.3	膨胀土滑坡的主要特征	(106)
6.1.4	膨胀土滑坡的运动规律	(108)
6.2	膨胀土路基边坡稳定性分析	(108)
6.2.1	确定性分析方法	(109)
6.2.2	非确定性分析方法	(124)
6.2.3	复合分析法	(125)
6.3	膨胀土路堑边坡稳定性分析(以南邓高速公路南阳段 工程为例)	(125)
6.3.1	公路膨胀土路堑边坡稳定性分析方法	(126)
6.3.2	基于灰色理论的膨胀土堑坡滑坍预测	(133)
6.4	膨胀土边坡处治现状	(140)

4 公路膨胀土处治理论与实践 ❖

6.4.1	边坡防护的基本原则	(140)
6.4.2	边坡处治技术发展趋势	(141)
6.4.3	植被护坡机理分析	(142)
6.5	膨胀土地区公路路基排水	(146)
6.5.1	弱膨胀土地区公路排水系统	(147)
6.5.2	中、强膨胀土地区公路排水系统	(151)
6.6	膨胀土边坡防护技术	(154)
6.6.1	膨胀土边坡植被建植技术	(155)
6.6.2	化学改良处理技术	(158)
6.6.3	柔性支护处治公路膨胀土滑坡技术	(159)
6.6.4	膨胀土树根桩防治技术	(168)
附 录		(175)
参考文献		(179)

第 1 章 膨胀土的组成和分布

1.1 膨胀土的矿物组成

膨胀土是一种具有吸水膨胀、失水收缩特性的粘性土，受其特殊矿物组成和化学成分的控制。

膨胀土在公路路堤施工期间和路堤使用时期，其工程特性主要取决于其主要粘土矿物类型及其物理化学性质。研究膨胀土的矿物组成和化学成分，不仅是了解膨胀土工程性质的内在要求，也是探讨其膨胀机理所必须的，而且是膨胀土改良和加固以及探讨膨胀土研究的新技术和新方法所必不可少的。

我们利用 X 射线衍射（XRD）等技术手段对膨胀土矿物组成进行了研究。X 射线衍射仪可对膨胀土中的不同矿物成分进行准确鉴定。粘土矿物的测定可利用粘土矿物 X 射线衍射图谱，通过比较主要的峰值和判断其强度来实现，并可根据衍射峰的强度和半高宽来定量分析某种矿物在膨胀土中的含量。

通常膨胀土的矿物成分包括粘土矿物和碎屑矿物。碎屑矿物主要成分为石英、云母和长石，其次为方解石和石膏等，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，对其胀缩性质影响不大，而影响膨胀土工程性质的主要是细粒部分的粘土矿物，特别是蒙脱石类的矿物。

通过膨胀土风干样品的 X 射线粉晶衍射图，据 JCPDS 卡片查对，鉴定出的主要粘土矿物为伊利石、蒙脱石、高岭石、石英、正长石和斜长石。通过定量计算衍射峰的强度和半高宽等，得出的膨

胀土矿物组合及含量如表 1-1 所示。从表 1-1 中可以看出, 膨胀土的粘土矿物以伊利石和高岭石为主, 分别占总量的 42% 和 22%, 而蒙脱石含量有限, 仅占 7% 左右。应指出的是, 不同地区膨胀土中, 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程度等方面的差异所形成的。

表 1-1 膨胀土矿物成分与含量

矿物成分	蒙脱石	伊利石	高岭石	石英	长石
含量 (%)	7	42	22	19	10

1.2 膨胀土的物理化学性质

膨胀土一般呈红、黄、褐、灰白等不同颜色, 具斑状结构, 常含有铁锰质或钙质结核, 土体常具有网状开裂, 有蜡状光泽的挤压面, 类似劈理。土层表层常出现各种纵横交错的裂隙和龟裂现象, 这由失水土体强烈收缩造成。这些裂隙破坏了土体的完整性和强度, 常形成软弱的结构面, 使土体丧失稳定性。

天然状态下, 膨胀土一般致密坚硬, 孔隙比一般小于 0.8, 但某些残坡积红粘土型膨胀土却可达 1.0 以上。膨胀土物质成分一般在水平方向比较均一, 但裂隙、微层理或隐层理却较发育。

膨胀土的液限、塑限和塑性指数都较大 (图 1-1), 液限为 40% ~ 68%, 塑限为 17% ~ 35%, 塑性指数为 18 ~ 33。膨胀土的饱和度一般较大, 常在 80% 以上, 但天然含水量较小, 大部分为 17% ~ 30%, 一般在 20% 左右, 所以土体常处于硬塑或坚硬状态, 强度较高, 内聚力较大, 内摩擦角普遍较高, 压缩性一般中等偏低, 故常被错误地认为是很好的地基。但在水量增加或结构扰动时, 其力学性质向不良方向转化较明显。资料表明, 浸湿后和结构破坏后的重塑土, 其抗剪程度比原状土降低 $1/3 \sim 2/3$, 其中内聚

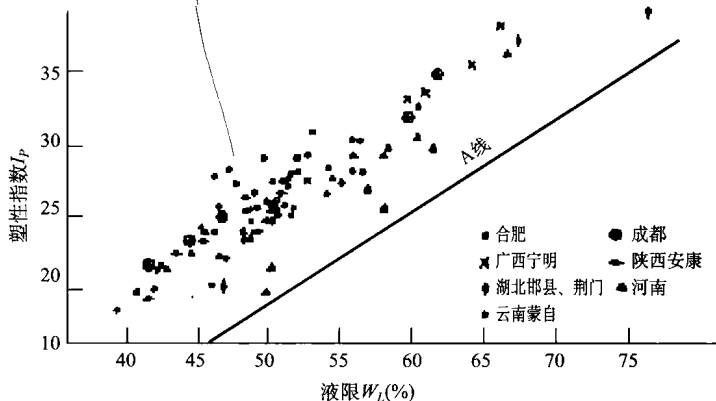


图 1-1 膨胀土在塑性图上的分布

力降低较多，内摩擦角降低较少，压缩系数可能增大 $1/4 \sim 1/2$ ，这与部分胶结联结被破坏和水膜增厚有关。

膨胀土的上述特征使得膨胀土在路基施工中对水反应敏感，水稳定性极差，不宜在工程中使用。

1.3 膨胀土的分布和分类

1.3.1 膨胀土的分布

膨胀土分布十分广泛，在世界六大洲中的多个国家都有分布。我国是世界上膨胀土分布最广、面积最大的国家之一，先后发现具有膨胀土危害的地区已达 20 多个省、市、自治区，遍布西南、中南、华东、华北和西北，东北地区也有少量分布。

从地形结构和地质构造上看，膨胀土一般分布在盆地内垅岗、山前丘陵地带和二、三级阶地上，大多数是上更新世及以前的残坡积、冲积物、洪积物，也有晚第三纪至第四纪的湖相沉积及其风化层，个别分布在全新世冲积一级阶地上。

1.3.2 膨胀土的分类

在我国,膨胀土几乎都是由各种火成岩构造(尤其是基性火山岩)、变质岩构造和沉积岩构造中的粘土岩、泥灰岩和碳酸盐岩等经过长时间的风化、淋滤和堆积而形成的。

膨胀土按其堆积和富集的方式不同,可划分为以下几种类型。

1.3.2.1 湖相沉积膨胀土

这类膨胀土广泛分布在我国云南、广西以及鄂、豫、晋、陕一系列盆地中。其岩性为一套以灰绿、灰白色为主,夹棕、黄等色的斑状粘土,或与粉细砂或砂砾层互层,含有钙质团块及铁锰结核和胶膜。这类粘土裂隙很发育,有的地方层理清晰。在盆地边缘,膨胀土的分选较差,所夹灰砂质粘土较多,越往盆地中心膨胀土的厚度越大,韵律增多,粒度变细,所夹粘土增多并有泥灰岩。有的膨胀土地层已经有轻度构造变动,但倾角一般小于10度。

1.3.2.2 冲积、洪积膨胀土

这类膨胀土几乎在我国所有的河谷阶地与一部分盆地和平原都有广泛分布,以深色物质为主,具有褐、黄、红、棕等色和有序或无序结构,膨胀土地层底部常有砂砾层。各种颜色的膨胀土层常以互层出现,许多地方在红、黄层之间,还夹有灰白色透镜体1~2层,但各层之间无明显分界线。膨胀土裂隙面大多充填有灰白色粘土条带或薄膜,呈蜡状光泽,含有钙质结核,有时钙质结核富集成层,形成钙盘,还可见锰结核。膨胀土地层厚度较大,据钻探显示,汉江阶地一般为20~30m,南襄盆地可厚达40~80m。

1.3.2.3 残积、坡积膨胀土

这类膨胀土主要分布在丘陵和山麓斜坡地带,其中尤以云贵、广西、鄂、鲁等岩溶地区及粘土岩地区分布普遍。膨胀土地层的岩性主要与风化母岩有密切的关系,一般由棕、红、黄等色的膨胀土夹少量基岩碎屑组成。这类膨胀土多由石灰岩、玄武岩、花岗岩、砂页岩及泥灰岩的残积风化壳形成,因此,土中的碎屑成分也依母

岩而定,大小不一,数量不等。由于母岩成分的差别,所形成的膨胀土粒度也有所不同,泥灰岩、石灰岩风化残坡积膨胀土质地较细,砂页岩与花岗岩类的残坡积膨胀土则质地较粗,且会有棱角状碎屑物。

1.3.2.4 洪积膨胀土

这类膨胀土常分布在山麓与山间盆地边缘,有时组成阶地垄岗的一部分,但分布范围有限,我国的伏牛山北麓及襄樊至安福寺的山前地带与山间盆地边缘,淮河坡积裙等地区洪积膨胀土较发育。膨胀土地层岩性常因地区不同和地貌部位的差别而有所变化,一般为棕黄、褐色等膨胀土或含有砾膨胀土,膨胀土地层底部常有砂砾层。

1.3.2.5 冰水沉积膨胀土

这类膨胀土在我国分布不多,目前资料表明,在成都平原二、三级阶地分布的成都膨胀土是比较典型的冰水沉积膨胀土,另外,太行山麓平原的邯郸膨胀土也被认为是与冰水沉积有关的湖相沉积物。

此外,膨胀土按粘土矿物分类,可以归纳为两大类,一类以蒙脱石为主,另一类以伊力土和高岭土为主。蒙脱石粘土在含水量增加时出现膨胀,而伊力土和高岭土则发生有限的膨胀。

1.4 膨胀土地质地貌

1.4.1 膨胀土的自然环境特征

1.4.1.1 膨胀土地区的地形地貌

膨胀土一般分布在山前地带及高级阶地,在盆地中部或低级阶地的下部有时也有膨胀土分布,由于其所处深度大,一般对地面建筑无影响。膨胀土大多为高塑性的黏性土,裂隙发育,常常易于滑塌,不能维持陡坎,故一般呈浑圆岗丘地形。

1.4.1.2 膨胀岩土地地区的地面变形特征

膨胀岩土地地区，有山前或高阶地前的坡前较陡地带，常形成浅层滑坡，多为古滑坡，有的已趋于稳定，有的尚在间歇性地向下缓慢滑移。在浅层滑坡形成的初期阶段，岩土发生蠕变，斜坡上部膨胀土的顶部向斜坡下方移动，移动的距离随深度渐减，而使土中的垂直节理呈向斜坡下方发生弯曲状。斜坡蠕动也常造成其上建筑物的破坏。

膨胀土地区空旷地面总是在无休止地上下运动，运动形式可分为膨胀型（上升型）、收缩型（下降型）及波动型三类。膨胀型的岩土中含水量较低，随着含水量不断增加，土层不断膨胀，表现为地面不断升高，收缩型则正好相反。不论是膨胀型还是收缩型，由于含水量随季节变化，它们的膨胀或收缩随季节有微小的变化，因此，这两种类型都是波动着向前发展。膨胀型或收缩型不断发展，达到一定限度后都成为波动型。此时，土中的湿度与大气中的湿度基本达到平衡状态，地面基本保持稳定，膨胀和收缩由于季节性的气候变化有微小的波动。因此，这三种类型是可以相互转化的。

1.4.1.3 膨胀土中的地下水

膨胀土虽有较多的裂隙，但水分通过这些裂隙时土即发生膨胀，裂隙被阻，渗透性变小。在接近地表部分，收缩裂缝较宽，渗透性较好，因而易形成上层滞水。上层滞水的深度常受土层中相对隔水层或隔水透镜体的控制。上层滞水的平面位置常与地面水的补给源有关。在平坦地区，土层比较均匀时，也可能形成统一的连续水面。

地下水的存在直接影响地基土的含水量，地下水位的变动直接影响土的含水量变化。在膨胀土地区，应注意研究地下水的分布、成因、动态及其补给源。

具有统一地下水位且埋藏浅的地区，水位变化幅度不大时，土层的含水量变化的可能性小，土的膨胀性和收缩性表现不明显。

1.4.1.4 膨胀土上的植被

植被对地基土的胀缩量 and 深度有很大影响。树根的生长以及对

已有植被的破坏,可影响土层含水量,进而造成地面大幅度的升降。当距离建筑物很近时,如果植被叶面蒸腾量大,根系很深和根系发达的乔木尤其是阔叶乔木,能大量吸收土中的水分,使土层变形的深度和面积增大,会对地面建筑物造成一定程度的破坏。此外,在密实的膨胀土中,土层不易压缩,树根的生长排开土体,使地基产生膨胀,也能造成轻型建筑物的局部破坏。因此,在膨胀土的工程环境条件下搞绿化时,应考虑建筑物周围的植树树种、距建筑物的距离以及浇灌方法对地基土含水量变化的影响等。

1.4.2 膨胀土地裂

地裂是膨胀土地区特有的不良地质现象,它的形成与发育是由膨胀土特有的矿物成分和外部环境因素所决定的。膨胀土富含蒙脱石、伊利石、高岭石和小于 $2\mu\text{m}$ 粒径的粘粒,所以颗粒细,表面积大,亲水性强;再加上上面一面叠聚体层状的微观结构,在非饱和状态下具有吸水膨胀和失水收缩往复变形的工程特性。在气候、地形地貌和人为因素影响下,造成膨胀土分布地区地面裂缝的形成与发育。这种不良地质现象给铁路、公路、水渠的路堤、路堑、边坡稳定造成危害,对低层砖石、砖混结构的工业和民用建筑损坏严重,而且难于防治。

1.4.2.1 膨胀土地裂的类型

膨胀土地裂按成因可分为原生地裂与次生地裂,按形态可分为闭合型地裂与开放型地裂,按深浅严重程度可分为深大严重地裂和浅层一般地裂。我们常见到的地裂都是在原生地裂基础上,在外部环境因素影响下形成的开放型深大严重地裂和浅层一般地裂,属次生地裂。膨胀土地裂的形成与发育,由膨胀土本身的工程特性和外部环境因素相互影响和相互依存的关系所决定。

1.4.2.2 地裂的形成与发育

(1) 原生地裂。膨胀土因富含蒙脱石等粘土矿物和小于 $2\mu\text{m}$ 的粘粒,这些粘粒成分在膨胀土沉积过程中呈胶体状溶液,高度分散

于粗颗粒之间，后由于水分不断蒸发凝固形成凝胶状态，继续蒸发脱水使其表面干缩产生龟裂，继续干缩使龟裂缝隙不断加深扩展。在后续沉积中经水补给使其裂隙闭合，进行再次沉积旋回。这就是膨胀土原生地裂产生的全过程。原生地裂在膨胀土中表现为垂直节理，其裂隙面光滑呈蜡质光泽。一般在不失水情况下呈闭合状态。

(2) 次生地裂。地裂按其大小、严重程度分为两类：一是深大严重地裂，二是浅层一般地裂。这两类地裂都属于开放型次生地裂。膨胀土大多属老粘土，沉积年代久，后经地壳上升、河流切割侵蚀，多出露于山前低丘、岗地、二级阶地上。在复杂环境地质作用下，再加上气候、人为多种环境因素影响，使膨胀土失去了原有的自然平衡状态，需要重新调整。在重新调整过程中，部分原生地裂发展扩大，形成开放型深大严重地裂和一般浅层次生地裂。这种地裂随着环境因素的变化而变化，是膨胀土对建筑物危害中最活跃、最不安定的因素之一。常说的膨胀土地裂就是指这种次生地裂。影响次生地裂的形成发育的主要环境因素有以下几个：

①气候与地形地貌自然地理环境因素。气候与地形地貌自然地理环境是次生地裂形成发育的重要外部条件。随一年四季降水、蒸发、温湿度条件的变化，在大气影响深度范围内水分不断转移，膨胀土含水量也随之变化，在平坦地形条件下，引起膨胀土以垂直方向为主的胀缩变形。但在坡地及临坡场地情况下，除垂直升降（胀缩）变形外，还有向坡面方向的水平位移。而这种水平位移可逆性差，常保留残余变形，久而久之使坡面场地及临坡场地沿等高线产生的地裂不断扩张和加深，形成开放型的深大严重次生地裂。如再加上大气降水或其他水的渗入，对地裂进一步劈裂和软化，在被地裂切割的土体自重作用下，就促使边坡土体向坡脚蠕动，甚至产生浅层滑坡等不良地质现象。

②特殊的水文地质条件。特殊的水文地质条件是地裂发育成不良地质现象的主要原因。膨胀土是老粘土，为不透水层。大气降水、农田灌溉、水渠、管道渗漏都是通过地裂渗流。膨胀土浅层地