

膨胀土特性与边坡稳定

殷宗泽 袁俊平 著

非外借



科学出版社

膨胀土特性与边坡稳定

殷宗泽 袁俊平 著



科学出版社

内 容 简 介

本书主要论述膨胀土的特性,尤其是裂隙对受力变形和边坡稳定的影响。一般黏性土在天气干燥时表层产生裂隙,降雨时裂隙则会闭合。而膨胀土产生的裂隙更为显著,且在雨水浸湿时裂隙未必全都闭合,而且裂隙在反复的干湿循环下不断向下发展,深度可达2~4m。由于膨胀土裂隙的存在和发展,抗剪强度显著降低,从而影响土体的稳定性。在实际工程中,针对膨胀土,主要考虑是否存在裂隙、裂隙发展程度、裂隙对抗剪强度指标的影响,以及对边坡稳定的影响等。这就需要针对具体状态确定相应的工程对策。本书为此提出相应建议和措施。此外,以镇江南徐大道黄山滑坡、新乡市潞王坟试验段、引江济淮试验工程为例,详细介绍土工膜覆盖法防护加固膨胀土边坡的具体措施,并获得良好的效果。

本书适用于水利工程、土木工程、交通工程等专业及相关专业本、专科生和研究生,以及相关高等院校、科研机构研究人员。

图书在版编目(CIP)数据

膨胀土特性与边坡稳定/殷宗泽,袁俊平著. —北京:科学出版社,2018.9
ISBN 978-7-03-058587-5

I. ①膨… II. ①殷… ②袁… III. ①膨胀土-边坡稳定性-研究
IV. ①TU475

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第195685号

责任编辑:惠 雪/责任校对:彭 涛
责任印制:张克忠/封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年9月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年9月第一次印刷 印张:12

字数:224 000

定价:89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在特殊土中，膨胀土是最常见的一种，也是在工程中碰到问题最多的一种。其吸水产生的膨胀变形要比一般土大，但计算分析方法仍与一般土相同，因此没有太大的难题。然而其边坡稳定的分析和工程处理，却往往是个相当棘手的问题。许多工程的膨胀土边坡在设计时就注意到适当放缓坡比，并设置偏于保守的边坡加固措施，但在工程施工过程中，在工程完工后，乃至工程使用若干年后，仍会出现边坡的失稳问题。

如何认识 and 解决这些问题，避免工程中可能出现的膨胀土边坡的失稳，就成为一个重要的课题。为此，许多工程界和学术界人士对此十分关注，并做了一系列深入研究。笔者也是如此，在二十多年的研究工作、工程处理和工程应用后，对不少问题渐渐有所认识，于是将其梳理总结，撰写成本书，主要论述膨胀土边坡稳定方面的问题。

根据多年来的工程研究工作，笔者以为，影响膨胀土边坡稳定的关键，是其存在裂隙。如果没有裂隙，其抗剪强度会相当高，也能像黄土那样形成直壁。而有了裂隙，膨胀土的抗剪强度就显著降低，坡比为 1:2, 1:4, 乃至达到 1:5, 仍会发生滑坡，导致边坡的失稳。膨胀土的边坡加固，实际上就是要制造某种条件，防止裂隙的产生和发展。

本书从下述几个方面论述膨胀土的裂隙：

- (1) 裂隙的产生和发展，是因其显著的胀缩性造成的。
- (2) 膨胀土边坡失稳不同于一般黏性土的边坡失稳；它表现出的浅层性、牵引性、平缓性、长期性等特性都是由于裂隙的存在和发展。
- (3) 膨胀土边坡失稳的工程实例表明，发生边坡失稳都与裂隙有关。
- (4) 裂隙的发展显著影响膨胀土的抗剪强度参数，特别是，采用常规室内试验方法确定的裂隙膨胀土的强度参数，并不能代表野外裂隙膨胀土的实际强度参数。这也是膨胀土边坡稳定性难以掌握的重要原因。

(5) 各种加固膨胀土边坡的合理方法，实际上都是为了控制和防止裂隙的产生和发展。譬如用一层土工膜覆盖于膨胀土上，阻止水分的蒸发，裂隙不再发展，以使边坡长期稳定。这就是有效方法之一。

总之，不管采取什么方法，只要能解决了防裂隙问题，那么影响膨胀土边坡稳定的各类问题，就不再是问题了。

著 者

2017 年 10 月

目 录

前言

第 1 章	膨胀土的基本特性	1
1.1	膨胀土的矿物成分与内部结构	1
1.2	膨胀土的胀缩性	2
1.2.1	膨胀性	3
1.2.2	收缩性	4
1.2.3	裂隙的发展	7
1.2.4	胀缩性引出的工程问题	10
1.3	膨胀土的特性指标与试验方法	12
1.3.1	自由膨胀率	12
1.3.2	膨胀率	14
1.3.3	膨胀力	18
1.3.4	收缩率和收缩系数	22
第 2 章	膨胀土边坡的稳定与失稳	26
2.1	膨胀土边坡的稳定性	26
2.1.1	难以把握的膨胀土边坡失稳问题	26
2.1.2	影响膨胀土边坡稳定的因素	29
2.2	膨胀土边坡失稳的特点	31
2.2.1	浅层性	31
2.2.2	牵引性	32
2.2.3	平缓性	33
2.2.4	长期性	33
2.2.5	季节性	34
2.2.6	方向性	34

2.3 几个膨胀土边坡稳定和失稳实例	34
2.3.1 某些新堆土坡的稳定	34
2.3.2 长期稳定的边坡发生的滑坡	35
2.3.3 施工中的滑坡	37
2.3.4 排桩加固后的失稳	41
2.3.5 小渠道膨胀土边坡的失稳	43
2.3.6 非膨胀土覆盖对边坡稳定的作用	44
第 3 章 裂隙对膨胀土强度的影响	45
3.1 关于膨胀土裂隙的几个问题	45
3.1.1 裂隙的状态	45
3.1.2 裂隙的发展程度	46
3.1.3 裂隙对强度的影响	47
3.1.4 水对裂隙的影响	48
3.2 膨胀土的裂隙对抗剪强度影响的试验	49
3.2.1 廖世文的试验	49
3.2.2 刘华强的试验	50
3.2.3 徐彬的试验	53
3.2.4 试验存在的问题	59
3.3 裂隙发展程度的量化	61
3.3.1 裂隙程度量化的灰度熵方法	61
3.3.2 灰度熵方法的初步应用	62
3.3.3 裂隙程度量化的其他指标	67
3.3.4 裂隙开展深度的探测方法	69
第 4 章 膨胀土边坡稳定性分析	72
4.1 膨胀土边坡稳定性分析中的问题	72
4.1.1 主要存在问题	72
4.1.2 降低抗剪强度参数的方法	73
4.2 膨胀土的裂隙及其影响	76

4.2.1	裂隙对强度指标的影响	76
4.2.2	受裂隙发展的影响	77
4.3	影响膨胀土边坡失稳的主要因素	80
4.3.1	裂隙	80
4.3.2	水压力	81
4.3.3	牵引性	82
4.4	抗剪强度参数试验中的问题	83
4.5	膨胀土边坡稳定分析方法	89
4.5.1	裂隙的状态	89
4.5.2	裂隙膨胀土滑坡失稳实例分析	92
4.5.3	抗剪强度参数	94
4.5.4	不同状态的膨胀土边坡稳定性计算	96
4.5.5	牵引性膨胀土边坡	101
第 5 章	膨胀土边坡的加固	108
5.1	控制裂隙发展加固膨胀土边坡	108
5.2	用材料覆盖防裂隙产生	109
5.2.1	覆盖法加固	109
5.2.2	对覆盖层的要求	113
5.2.3	坡顶的覆盖	117
5.3	防止施工开挖暴露产生裂隙	118
5.3.1	膨胀土挖坡与填坡工程的不同	118
5.3.2	膨胀土边坡开挖中避免暴露	121
5.3.3	坡顶面的保护	123
第 6 章	土工膜覆盖法防护膨胀土边坡的工程应用	126
6.1	镇江南徐大道黄山滑坡治理工程概况	126
6.1.1	边坡失稳历史	126
6.1.2	边坡水文地质条件	129
6.1.3	滑坡的前期治理	135

6.2	土工膜覆盖法治理镇江南徐大道黄山滑坡的现场试验	138
6.2.1	试验方案	139
6.2.2	试验结果及分析	144
6.3	土工膜覆盖法在镇江南徐大道黄山滑坡治理工程中的应用	152
6.3.1	方案改进	152
6.3.2	实施过程	155
6.3.3	现场观测布置	156
6.3.4	现场观测结果及分析	157
6.3.5	综合分析讨论	162
6.4	土工膜覆盖法在新乡市潞王坟试验段中的应用	163
6.4.1	工程概况	163
6.4.2	防护方案的改进	165
6.4.3	工程应用及效果	167
6.5	土工膜覆盖法在引江济淮试验工程中的应用	170
6.5.1	工程概况	170
6.5.2	防护方案设计	171
6.5.3	工程应用及效果	174
参考文献		178

第 1 章 膨胀土的基本特性

本章主要论述膨胀土特性。它的胀缩性远超过一般黏性土；存在的蒙脱石是其胀缩性显著的重要原因。所谓“胀”，一般材料都是由于力的降低或消失；而“缩”，则是由于力的施加。但对于土的胀缩，除了力的作用而外，影响更大的是水的作用：即吸水膨胀和失水收缩。而在不同性质的各种土中，胀缩性最大的则是膨胀土。正是其显著的胀缩性，造成了裂隙的产生和发展，由此又引出膨胀土边坡失稳中的许多问题，这正是本书着重阐述的。本章还介绍了膨胀土问题中的几个特定的词汇——自由膨胀率、膨胀率、膨胀力、收缩率和收缩系数等的概念，以及其试验方法，参数确定方法和在工程问题中的应用。

1.1 膨胀土的矿物成分与内部结构

膨胀土的矿物成分中，蒙脱石所占比例是相当大的。如南水北调中线工程的不少地区，蒙脱石所占比例达 30%~55% (刘特洪, 2011)。

蒙脱石的晶胞结构由三层组成，外面两层为硅氧四面体层，中间夹有一层铝氢氧八面体层，如图 1-1 所示。蒙脱石晶体片，一般为几层到十几层晶胞叠加而成。两层晶胞之间是氧原子与氧原子相连，靠分子间的范德华力相互连接，但连接很弱，水分子容易进入晶胞之间，使晶胞间的间距增大。因此，吸水后体积膨胀，而脱水后则体积收缩。膨胀土的黏土矿物中含有一定量的蒙脱石矿物，因而具有显著的膨胀性；相应地失水后也有显著的收缩性。一般来说，土体中若蒙脱石含量达 5% 以上，就会有可观的胀缩性。

伊利石也是三层结构，由于其晶胞间有钾离子和钠离子，连接较强，水分子不易进入。因此，伊利石的胀缩性不及蒙脱石。

而高岭石仅是两层结构，其晶胞间有氧原子和氢氧离子连接，水分子不易进入，故胀缩性较弱。

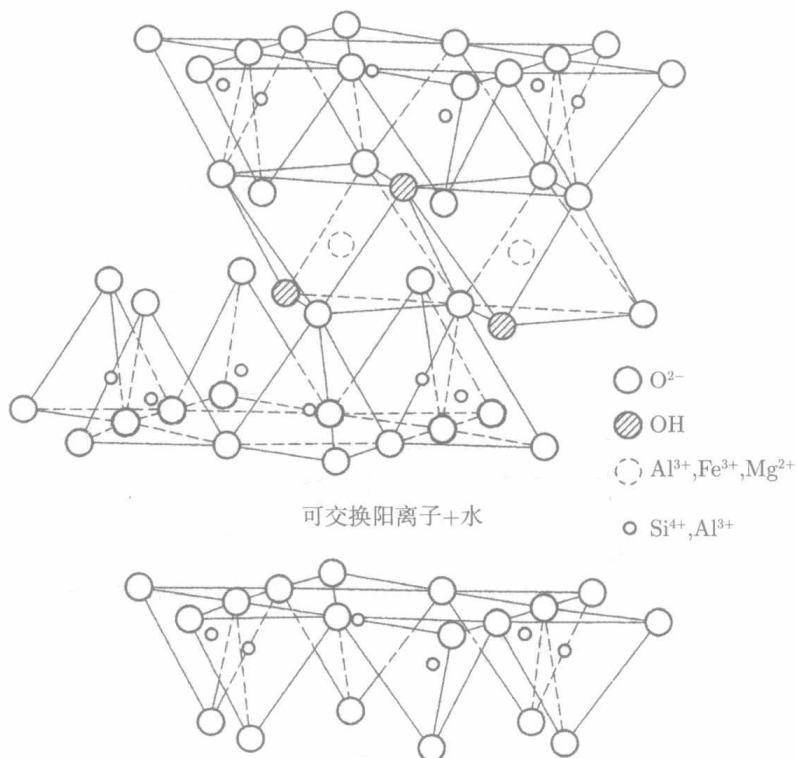


图 1-1 蒙脱石的晶胞结构

因此，膨胀土的胀缩性主要来自蒙脱石和伊利石。所谓强膨胀土和弱膨胀土，主要是指其中蒙脱石和伊利石含量的多少（在土中所占的比例），尤其是蒙脱石含量比。

1.2 膨胀土的胀缩性

土的胀缩性，就是吸水膨胀，失水收缩的特性，是由于上面所讲的矿物成分引起的。一般黏性土中往往也含有上述几种矿物成分，只是蒙脱石、伊利石的含量所占比例较低，胀缩性较弱。而膨胀土中因为那些引起晶胞间吸水的矿物成分所占比例较高，故胀缩性较为显著。因而将其称为“膨胀土”，以示与一般黏性土的不同。也给人们提醒，这种黏性土不同于一般的黏性土，在工程中应特殊对待，因而被列入“特殊土”。

1.2.1 膨胀性

一般黏性土吸水后均有所膨胀，而膨胀土吸水后，产生的膨胀量要更大。假设一均质无裂隙的膨胀土，由于雨水浸湿，水缓慢浸入土体深部，深度达 h ，则被浸湿的 h 厚膨胀土层都将膨胀，以致地面的膨胀量为 Δh ，具体如图 1-2 所示。

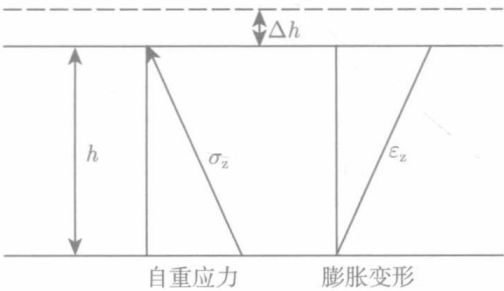


图 1-2 吸水膨胀

针对图 1-2，需要补充说明以下几点：

(1) 黏性土（包括膨胀土）都存在竖向自重应力 σ_z ，它是自上向下大体成线性逐步增大的。膨胀土吸水膨胀时，顶部由于没有自重应力的压制，即 $\sigma_z=0$ ，故膨胀变形最大；愈向下，自重应力 σ_z 愈大，受到上层土重的压制，则膨胀变形 ε_z 愈小。在一定深度以下，由于受到土自重应力的压制，膨胀变形就为零了，见图 1-2。有些膨胀土地基上的一、二层的房屋，会因地基吸水而发生膨胀，地基又因膨胀不均而使墙壁开裂，甚至倒塌；而四、五层的楼房却安全，就是由于后者压制地基的膨胀。

(2) 近地面的膨胀土，会由于暴露于空气而收缩，收缩不均产生裂隙。当地面再受降雨时，水会流入裂隙，并逐步向深部发展。这会加深膨胀的厚度。不仅使有裂隙的部分强度显著降低，而且下面尚无裂隙的部分也会因吸水而稍有膨胀。无裂隙的膨胀土透水性是很低的，渗透系数约为 10^{-7}cm/s 。故上面的水渗入内部过程较慢。雨过后，膨胀停止，就使膨胀发生的深度限制在一定范围内。

(3) 在下面的膨胀土由于水分较难渗入，往往长期处于非饱和状态，含水率变化较慢，其土质相当坚硬。对于深度较厚膨胀土层，其上部可能为易吸水膨胀的土层，而下部则处于非饱和状态。可能发生膨胀的深度如图 1-3 所示。这只是一个模糊的概念上的划分。不仅是饱和与非饱和状态不易划分，而且上部土体，包括有裂

隙的土层，含水量也是多变的，不固定的。

总之，当膨胀土吸水膨胀后，土质有所疏松，强度有所降低。这对于其受力变形，以及边坡的稳定性，都是有影响的。

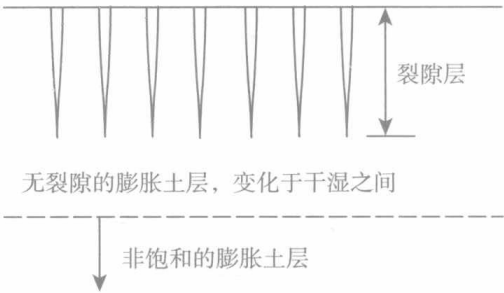


图 1-3 有裂隙膨胀土的状态

1.2.2 收缩性

1. 水分蒸发引起土的收缩

在地表附近，膨胀土中的水分会因日晒和风吹，而逐步蒸发。土孔隙中的水分被蒸发，其体积自然会收缩。收缩包括上下，以及前后左右等各个方向。前面提到的膨胀，只有竖向向上的膨胀变形；而侧向，即前后左右，会受到相邻土体的约束，即自重侧压力 σ_x 的作用，土体无法膨胀。这里讨论收缩，除了竖向收缩而外，还会产生侧向收缩，如图 1-4 所示的单元体 A。不过侧向收缩并不是不受限制的。

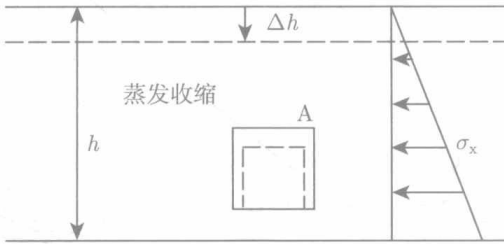


图 1-4 土体蒸发收缩

一方面，侧向收缩必然存在某种导致收缩的应力 σ_s ；另一方面，膨胀土也存在两种限制侧向收缩的应力，具体如下：

1) 抗拉强度

黏性土 (包括膨胀土), 不同于砂性土, 它具有一定的黏结力, 即抗拉强度 σ_p ; 它是一种阻止侧向土体被拉裂的应力。需要说明的是, 抗拉强度 σ_p 不同于抗剪强度 c , 是剪切方向的强度; 而抗拉强度 σ_p 是法向的强度。

2) 自重侧压力

土体存在自重侧压力 σ_x 。它是两个相邻的土体单元之间因重力而产生的相互作用的侧向应力。它与土体的竖向自重应力 σ_z 相似, 是向下成线性增加的, 如图 1-4 所示。其间的关系为

$$\sigma_x = K_0 \sigma_z \quad (1-1)$$

式中, K_0 为静止侧压力系数。当然, 自重侧压力 σ_x 也是阻止土体侧向收缩的应力, 因而也就能阻止相邻土体被竖向拉裂。如果竖向被拉裂, 这就意味着裂开的竖向面上已不存在法向压应力, 即自重侧压力 $\sigma_x = 0$ 。

2. 收缩与裂隙的产生

若收缩应力 σ_s 小于两个限制侧向收缩的应力之和, 即

$$\sigma_s \leq \sigma_p + \sigma_x \quad (1-2)$$

则膨胀土体只有竖向收缩, 而膨胀土体在侧向不会收缩; 因而侧向相邻的土体不会被拉开, 仍为一体, 也就不会产生裂隙, 如图 1-5(a) 所示。

若收缩应力 σ_s 大于两个限制收缩的应力之和, 即

$$\sigma_s \geq \sigma_p + \sigma_x \quad (1-3)$$

则膨胀土除了竖向收缩之外, 还会发生侧向收缩, 并使相邻的侧向土体拉裂, 形成竖向裂隙; 如图 1-5(b) 所示。

膨胀土的裂隙从地面表层开始逐步向下发展。在裂隙发展初期, 深度 h 会逐步增大。几年后裂隙深度 h 达到稳定。裂隙深度 h 通常不会太深, 大多在 2~4m。因为愈深, 自重侧压力 σ_x 愈大, 如图 1-5(b) 所示。在深度 h 以内, 收缩应力 $\sigma_s \geq \sigma_p + \sigma_x$; 而深度超过 h , 则收缩应力 $\sigma_s \leq \sigma_p + \sigma_x$, 也就是下面不再产生裂隙。

膨胀土吸水容易膨胀。蒸发失水时则容易收缩，从而产生较大的收缩应力 σ_s ，进而能撕裂土体，产生裂隙，如图 1-5(b) 所示。膨胀土是多裂隙土，也称为“裂土”。这就是膨胀土不同于一般黏性土，具有更显著的裂隙性的根本原因。

对于一般黏性土，在通常的气候变化条件下，蒸发引起的收缩应力 σ_s 是不大的，常如图 1-5(a) 所示，土体仅发生竖向的不大收缩，很少会产生裂隙。但当天气很干燥，或气温较高时，接近表面的土中水分的蒸发强烈，黏性土的收缩应力 σ_s 也会显著增大，进而使表层土体产生裂隙，并向深部发展，如图 1-5(b) 所示。譬如大旱之年，农田中见到普遍存在的龟裂；又如，河边淤泥露出水面，经风吹日晒后，也会产生龟裂现象。这些土，并不是膨胀土，而是一般黏性土。图 1-6 所示的就是普通黏性土的龟裂状态。

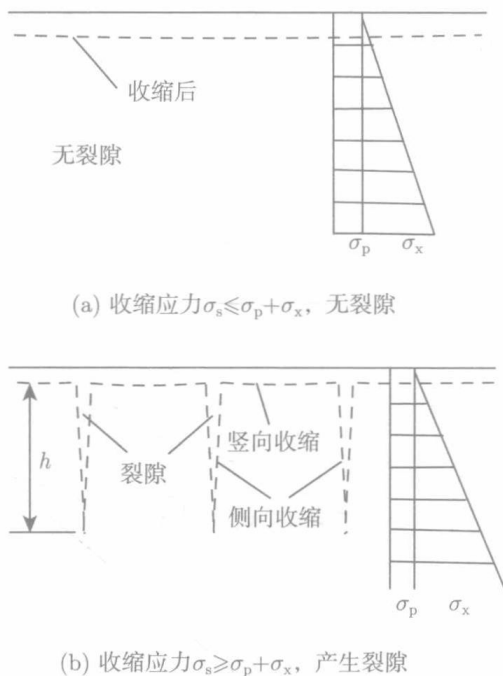


图 1-5 裂隙的产生与不产生

膨胀土的胀缩性是黏性土中最突出者，当其失水收缩时产生的裂隙尤其显著。这就是导致膨胀土边坡失稳，产生许多麻烦问题的根本原因。

一般黏性土产生的裂隙通常不深，夏季农田中龟裂的深度达到 30~40cm 就很少。对于膨胀土，前面提到其晶胞结构之间有较大空间可吸入水分。当蒸发而失去

水分时,就留下形成裂隙的较大空间。因而裂隙深度也较大,可达到 2~4m,个别情况甚至更深。而一般黏性土的晶胞结构之间的空间较小,只能产生较浅的龟裂。



图 1-6 黏性土的龟裂

砂性土是不会产生裂隙的。这是因为它有较大孔隙,颗粒间又无黏结。表层砂土颗粒间的水分蒸发时,下面的水分可逐步补充。即使水被蒸发干,无黏结的颗粒也不可能形成排列整齐且有一定宽度的裂缝。可见裂隙的产生与土的颗粒成分也有一定的关系。

1.2.3 裂隙的发展

1. 向深部的发展

膨胀土 (及其他渗透性低的黏性土) 的竖向裂缝产生后,会继续向深部和侧向发展。

这时已产生的竖向裂缝面和地表面一样都暴露于大气,则成为水分的蒸发面。它一方面加速裂缝两侧土中水分的蒸发,另一方面使裂缝下端土中的水分有较近的逃向大气的通道。于是增加了裂缝向下的发展,如图 1-7(a) 所示。

当然裂缝向下的发展是有限度的。由图 1-4 可见,愈向下土的自重侧应力愈高,愈难将土体撕裂。因此膨胀土的裂隙,一般最深也就在 3~4m 的深度。

裂缝除了向下发展之外,还会向侧向发展。前面提到竖向裂缝产生后,裂缝面也成了水分蒸发面。而与其相邻的侧向区域,如图 1-7(b) 中的点划线 AB 围成的区域中的水分,尚未到达发生显著蒸发的状态,为无裂缝区。这就造成裂缝面与 AB 面之间的收缩应力差异。在已产生的裂缝面 CD 上,收缩应力 σ_s 大,符合式 (1-2)

的条件；而 AB 面以内收缩应力 σ_s 尚小，仅符合式 (1-3) 条件。这样，在 CD 面上就产生横向裂缝，并向 AB 面发展。当然，随着时间推移， AB 面将向侧向收缩，并向下移动；使横向裂缝逐步发展。不过这种横向裂缝不可能很深；因为会受到上面土体重量的压制。

图 1-7(c) 和 (d) 是直剪试样在若干次干湿循环后，裂隙的发展状态。其中图 1-7(c) 中试样上表面的裂隙较细，而图 1-7(d) 中侧向裂隙张开度较大，这是反常的。这是由于试样的土体之间存在黏聚力，而与金属的环刀间无黏聚力，故土样风干收缩时，首先是横向向内收缩，与环刀脱开，产生土样与环刀之间的裂缝，其张开度就较大，进而使土样之间的裂缝张开度变小。另一方面，由于土与环刀间竖向裂缝张开度大，产生图 1-7(b) 中所示的横向裂隙，而且该横向裂缝发展旺盛，张开度大，如图 1-7(d) 中所示。图 1-7(d) 充分显示横向裂隙的存在和发展，是值得重视的。

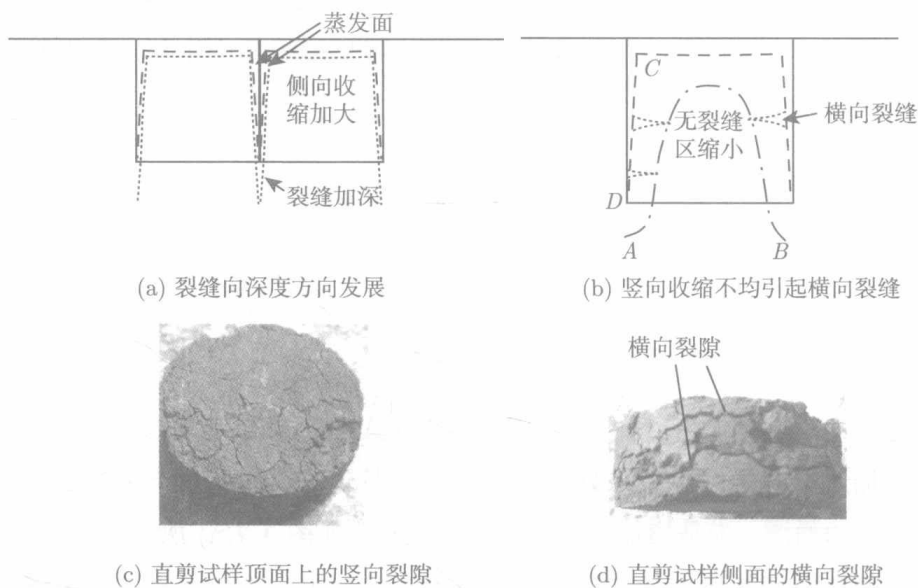


图 1-7 裂缝的发展

2. 干湿循环加速膨胀土裂缝的发展

土体中水分的多少受天气变化，尤其是晴雨状态的影响，从而形成干与湿的循环变化。这种干湿循环会加速膨胀土裂缝发展。其发展过程如下：