

黄文熙讲座

# 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题

Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope

包承纲

(长江科学院, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**主要叙述非饱和膨胀土及其边坡稳定研究方面的新进展。首先讨论了非饱和土研究中与土坡稳定性有关的若干重要特性,指出非饱和土的气/水形态问题是非饱和土研究的一个基本问题。并提出随含水率由小变大,非饱和土存在四种气/水形态,不同气/水形态的土具有不尽相同的性状。然后,对非饱和土的吸力和土水特征曲线以及不同气/水形态下的强度作了讨论,并对非饱和土的本构关系作了简要的介绍。接着以南水北调中线膨胀土渠道工程为背景,以吸力问题为中心,对非饱和和膨胀土边坡滑动的各种内在的和外界的因素进行了分析,尤其对新近研究的降雨入渗和裂隙影响的研究进行了定量的分析,改变了以往对这方面只进行定性研究的情况。在此基础上对边坡失稳的机理和考虑裂隙及雨水入渗的稳定分析方法进行了研究。

**关键词:**非饱和膨胀土;气/水形态;吸力;降雨入渗;裂隙网络;边坡稳定

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 4548(2004)01 - 0001 - 15

**作者简介:**包承纲(1935 - ),男,1958 年清华大学水利系毕业,长江科学院教授级高工,浙江大学、河海大学、浙大宁波理工学院兼职教授,长期从事岩土工程研究和实践工作。



BAO Cheng-gang

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** This paper focuses on the advance in fundamental behavior of unsaturated soil and slope stability. Some important properties of unsaturated soil associated with slope stability are discussed with emphasis on the fundamental problem of unsaturated soils, i. e., air/water phases and their movement. "Four-stage air/water phase" division is put forward for an unsaturated soil in which the moisture condition varies from dry to saturated. Detailed experimental studies demonstrated that an unsaturated soil would exhibit different behavior at different states of air/water phase. Then, for unsaturated soil the suction in an unsaturated soil and its relationship to water content (i. e., soil-water characteristic curve (SWCC)) are discussed. A simple equation for describing the shear strength of unsaturated soils was proposed on the basis of the four-state division of air/water phase. The recent advance in the constitutive relationships of an unsaturated soil is also introduced briefly.

After that, under the engineering background of the South-to-North Water Transfer Canal, the major internal and external factors affecting the slope stability in unsaturated expansive soil are discussed with the utmost concern to suction. Special discussions are put on the recent developments in the quantitative analysis for the effect of cracks on rainfall infiltration and shear strength of expansive soils.

Following that, a full-scale field study on rainfall infiltration into an unsaturated expansive soil slope and a comprehensive laboratory study on the behavior of the unsaturated expansive soil are presented. On the basis of the valuable data obtained from the field and laboratory studies, some new findings for the mechanism of rain-induced landslides in unsaturated expansive soils are presented, and the slope stability analysis method considering the influences of crack and rainfall infiltration is presented.

**Key words:** unsaturated expansive soils; air/water phase; suction; rainfall infiltration; web of crack; slope stability

## 0 前 言\*

非饱和土是一种三相土,与饱和土不同,非饱和土中不仅有固相(土粒及部分胶结物质)和液相(水和水溶液),而且还有气相(空气和水汽等)存在。气相的存在使土的性质大为复杂化,它的基本特性与饱和土有所不同,这些特性给非饱和土工程性状的研究带来了许多困难,以致目前对非饱和土基本性质的研究仍不很成熟,而非饱和土的理论原理和计算方法以及它们介入工程的程度则还处于初步阶段。

非饱和土因气相的存在导致其性质复杂化的问

题,不仅在于气体本身会使土中流体具有可压缩性,或者气与水之间会在一定条件下发生溶入或逸出等现象,更主要的是固、液、气三相之间界面上形成的界面现象(如表面张力现象)。这种界面现象的存在使土中两种流体承受不同的压力(孔隙水压力和孔隙气压力出现显著的差别)。而且在许多情况下,孔隙水由于受表面张力作用而在土中出现了负孔隙压力,这是使非饱和土具有与一般饱和土不同特性的重要原因之一,于是饱和土的许多理论原理与计算方法不再适用于非

\* 收稿日期:2003 - 11 - 28

饱和土<sup>[1,2]</sup>。

非饱和土在自然界广泛地存在,真正的饱和土在自然界是很少的,尤其在干旱与半干旱地区,由于受气候条件的影响,存在着若干种具有特殊性质的土类,如膨胀土、崩解土(黄土等)、残积土等,统称为“特殊土”。它们均具有非饱和土的基本特性,即土体内通常存在着吸力。这种特征在膨胀土中表现得尤为明显和重要。因此,非饱和土理论就越来越密切地介入到膨胀土的研究中。这样不仅增加了膨胀土研究的活力,开阔了探索的视野,而且鉴于非饱和土力学的理论框架已有一定进展,也使今后膨胀土研究有了比较坚实的理论基础,从而使研究向着更加理性化的方向发展。

本文以南水北调中线工程总干渠(总长 1260 多 km)上 100 多 km 的膨胀土渠段的边坡问题等为工程背景,将以往我国几十年在非饱和膨胀土方面的某些研究成果加以归纳和提升,形成了一条思路。文中将首先介绍非饱和土特性方面的若干研究成果,其中主要涉及笔者及其合作者在以往 20 多年以及近期所做的一些工作<sup>[3~6]</sup>,然后,对膨胀土尤其是南水北调中线渠道工程膨胀土的性状作些讨论,接着以吸力问题为中心,把非饱和土理论与膨胀土性状相结合,对非饱和膨胀土边坡滑动的各种内在的和外界的因素进行分析,尤其是对近来研究的降雨入渗和裂隙影响的成果进行了较为详细的阐述,这些成果在前人的文献中尚不多见。最后,对边坡失稳的机理和稳定分析方法进行了研究。

## 1 非饱和土的性状

前文已指出,土体中含有气体使非饱和土的性质远比两相的饱和土复杂,饱和土的某些原理对非饱和土不再适用,或者需要重新论证。弄清非饱和土的基本性状和工程性状及其主要影响因素,在此感性认识的基础上进行性质抽象和关系抽象<sup>[7]</sup>,建立非饱和土研究的基本思路,探索在工程中考虑这些性状的本构关系和定性的、定量的分析方法,提出合理的计算公式,选择合适的特性参数试验方法(尤其是吸力的量测技术),确定各特性参数量值的范围,并将分析结果在实践中进行验证和修正等:这些就是非饱和土力学研究的主要任务。鉴于本文的主题为边坡稳定,因此在叙述中与稳定性相关的内容叙述得较为详细,为节省篇幅,与稳定性关系较少的内容则叙述得较为简单。

### 1.1 气水形态

#### 1.1.1 研究概况

前文已指出,非饱和土与饱和土的根本区别在于孔隙中存在着气体以及气、水与土骨架三相之间的复

杂的界面现象。可见气相的存在是导致非饱和土性质复杂的主要原因,因此气相以及水相的各种存在形态,以及受力后气、水在土骨架中的运移规律,必将对力学性质产生重大影响,也就是说,不同的气、水形态会有不同的力学性质。因此,气/水形态问题的研究应是非饱和土首先研究的问题。在以往许多非饱和土文献中,确实首先指明所研究的问题是针对何种气/水状态而言的。但也有些研究成果没有明确这个前提,这样会使研究工作缺乏明确的对象。

有关气/水形态方面的工作可以追溯到半个世纪之前。1957 年的 Corey<sup>[8]</sup>,1963 年的 Yoshimi & Osterberg<sup>[9]</sup>,1965 年的俞培基和陈愈炯<sup>[10]</sup>等都提出过水、气形态划分的问题,其中俞陈提出的“气水三阶段”划分法,即“水封闭”、“双开敞”和“气封闭”比较简单明了,给后人以很好的启示。70 年代,笔者(1979)<sup>[3]</sup>在压实土试验的基础上提出了“气相四形态”划分,并以吸力试验、气渗性试验来验证上述划分的合理性,同时进行非饱和土的孔压消散试验来解释气/水的运移规律。1996 年 S. K. Vanapalli<sup>[11]</sup>在分析土水特征曲线的基础上提出按吸力大小划分非饱和土四个阶段的学说,并将其与抗剪强度联系起来。他的划分与笔者 1979 年的划分有相似之处。

在上世纪末和本世纪初,我国土力学界结合非饱和土的有效应力原理的讨论,对气水形态和吸力的本质等问题的研究又重新活跃起来,汤连生和王思敬认为,“在进行非饱和土的水、气运移特性及其有效应力的研究中,一定要重视不同的工程分类土的气、液、固三相的相互作用及表面张力现象的研究”<sup>[12]</sup>。他们并建议,非饱和土按其含水状态划分为悬挂状非饱和土、索状非饱和土和弧立空气非饱和土三种,三种含水状态非饱和土的湿吸力遵循的规律不同,其有效应力表达式也截然不同。苗天德等<sup>[13]</sup>的论文在题目中就指明他们的研究是针对“低含水率非饱和土”而言的,其特征是气相连续的非饱和土,与外界大气取得平衡,此时气相连通并可传递压力。

在上述的各种划分中大致可归结为两种主要类型,即俞陈的“水气三阶段”划分和笔者的“气相四形态”的划分。下面将着重对后一种划分进行讨论。

#### 1.1.2 气水形态研究中的若干假定

1) 非饱和土骨架中间的孔隙是由许多粗细不同、形状各异的“管道”体系组成的。“管道”的大小是变化的,有的是“狭颈”,有的是较为宽阔的“空腔”。

2) 各管道内部可以互相连通(总能找到可以连通的通道)且与外界(大气)有通路。

3) 土粒表面的结合水膜作为固相的一部分,不作

为液相看待,水中的溶解物作为液相处理,气体服从波义耳定律( $PV = P'V'$ )。

4) 当土中具有一定的水分时,土体的外表面(或表部)会形成弯液面,即土体的表部会首先被封闭起来。

5) 土中的水有的可因重力作用而发生运动,有的可因水分子受力不平衡而发生迁移(毛细作用),它们的驱动因素不尽相同。

### 1.1.3 气相形态的分析

前文已述及,非饱和土体中存在着大小和形状多变的孔道体系,当水分很少时,水分只能占据细的“狭颈”孔道,且互不连续,这时气相与外界大气连通(平衡)。这种状态在俞陈划分法中称为“气开敞”。而在笔者的划分中称为“气相的完全连通(连续)形态”。另一种与此相反,当土中的水分很多时,液相不仅占据了全部小孔道,而且也占据了大孔道,气相被液体分割包围,形成孤立气泡悬浮于液体中,气相完全被封闭,与大气不能连通,固液气三相的界面现象消失,这时,非饱和土与饱和土的性状差别主要在于前者孔隙中的液体是可压缩的,而后者孔隙中的液体不可压缩,此即为气相的“完全封闭状态”。

上述两种情况比较极端,也比较简单,介于上述两阶段之间的形态,则要复杂得多。对此,有不同的划分法,三阶段划分法将其称为“双开敞”阶段,即气相和液相均向大气开敞的意思,但这样划分似乎过于简单化了。事实上,“双开敞”的形态是一个很不稳定的阶段。当水分从“气相完全连通形态”增大时,土体中的部分不连续水相可以逐步地接续起来,并与外界相通。但这种情况只是部分发生,其余部分仍保留着气相与外界(大气)连通的状况。在这一阶段,土体受压后的变形将是相当迅速的。这阶段在“四形态的划分”中称之为“气相的部分连通形态”。

当土中的水分继续增多时,不连续水的接续现象会继续发展和蔓延,由于毛细水的迁移,在土体的表部首先将会形成连续的水膜,从而把气相与大气暂时隔离开来。这时,气相仅在土体内部存在连通现象,它在四形态划分中称为“气相的内部连通形态”。研究表明,非饱和土处于“内部连通”与处于“部分连通”时的性状将有显著的不同。

在上述四种形态中,不言而喻,部分连通与内部连通两种形态将是非饱和土力学的主要研究对象。因为对于完全连通状态,可以看作“干土”,问题比较简单;而对于完全封闭形态,则可将它简化为内部充满可压缩流体的饱和土,许多饱和土的成果可以延伸和利用,故不是非饱和土研究的重点。

### 1.1.4 气相形态的试验研究

为了验证上述气相形态,进行了吸力试验和气渗试验。吸力试验是对压实壤土试样采用暴露底板法(exposed-end method)进行,详见有关文献。试验成果如图 1 示。图中除吸力与含水率关系外,还有干密度和饱和度与含水率关系。

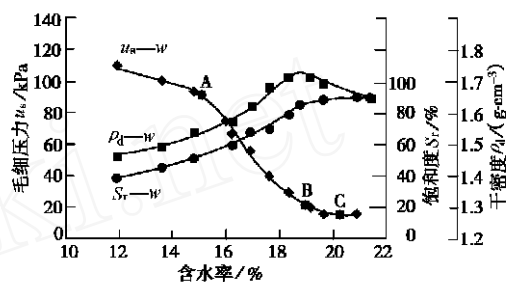


图 1 不同含水率的毛细压力(吸力)变化曲线

Fig. 1 Suction vs water content

从图中可以发现几个特征点 A、B 和 C。在 A 点之前( $w < 15.2\%$ ),吸力  $u_s$  值较高,且随  $w$  的变化不大,这正是完全连通形态的特征。随着  $w$  的增大,吸力急剧地下降,但到达 B 点后,吸力的减速明显减缓,当进入 C 点后,则基本不变了。AB 之间反映了气相部分连通形态的特征,这是气相最活跃的阶段,此时毛细水在土中的运移也十分频繁;BC 段即为气相的内部连通形态阶段, B 点在击实曲线上对应着峰值点,土中的孔隙,尤其是土体的周边部分,孔隙的孔径较小,导致毛细水膜在周边“细径”上遍布,阻断了气相与大气的连通。这时,只有当气相的压力变得很大的情况下才可能突破“水膜”的屏障“破门而出”。这种现象可以在下面的气渗性试验中得到验证。

所谓“气渗性”是在一定的压力梯度下气体透过土体的能力,气渗性高,表示土中气相的连通性好。相反,当孔隙为水所占据时,就会阻碍气的渗透。

试验时,气压分级施加,然后逐渐降低,依此求得不同气压梯度下的气渗量与含水率的关系,如图 2 所示。可以看到,在 A 点之前,气渗性基本上不受含水率的影响。AB 之间气渗量变化很大,超过 B 点后,气渗性很低了。分析一下气渗系数与压力梯度曲线(图 3)是很有意思的。当含水率  $w = 17.3\%$  时,增压曲线与减压曲线是重合的,这说明气体的进与出基本上无阻隔的。当  $w = 18.2\%$  时,两类曲线出现了分叉,其分叉的程度随  $w$  的增加而变得明显,这是因为气相在增压到一定程度时,土体表面的水膜被冲开,使气渗性增高。这种过程并不完全可逆,因此减压曲线不再沿增压曲线的轨迹,这一点在上面的分析中已经提及,从而再次验证了气相内部连通形态的存在。

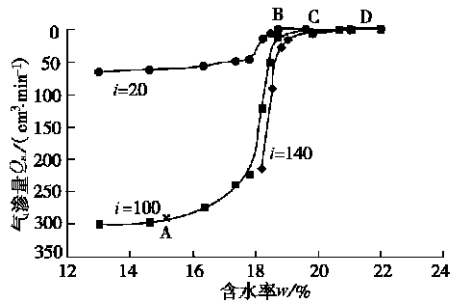


图 2 气渗透量与含水率关系曲线

Fig. 2 Curve of air volume passing specimen vs water content

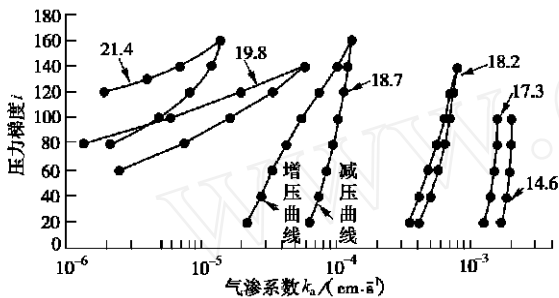


图 3 不同含水率下的气渗透系数与压力梯度关系曲线

Fig. 3 Curve of air-permeability coefficient vs pressure gradient (under different water content)

### 1.1.5 孔压消散试验

鉴于孔压的消散最能反映土体孔隙中流体的移动、排出和土粒位置调整的情况,因此还进行了孔压消散试验。这种试验在一定程度上也可反应非饱和土与饱和土性状的不同。试验是在略加改装的三轴剪力仪上进行的,试样顶部测孔隙气压力。室压力分三级施加,在每级压力下待孔隙水压力和孔隙气压力稳定后,打开顶部阀门进行消散至 90 %消散度后,再加下一级压力并消散,如此连续进行三级消散。图 4 示出了不同气相形态下孔压的发展过程,其中的(a)、(b)、(c)和(d)图分别属于四种气相形态。在完全连通的气相形态下(图 4(a))孔压均为负值。这时,当土体受荷后排出的流体仅为气体,且固结过程进行得很快;图 4(b)属部分连通形态,在开始时,孔压是负的,但孔压随外荷的增高而增大,当外荷较高时,孔隙水压力会变成正值,孔压的变化正是由于孔隙气压力的增大而造成的。本阶段排出的仍以气体为主,水处于张力状态不会排出,因此固结速率也比较快。在内部连通形态下(图 4(c)),开始为负孔压,但当施加很小的外荷后,试样底部均变为正孔压,而消散速率则显著变慢,这正是土中孔隙的出口处被水封闭造成的。由于孔隙气压力增高,气与水均可能排出,因为气体会冲开水膜的封闭,这就是图 3 中增压曲线与减压曲线分叉的原因,这个过程是不可逆的。与第二形态图 4(b)相比,它的固结速率明显变慢,且随含水率的不同,变化很大。因为水

的排出显然比气体的排出要慢,且水的排出比例越多,排出越慢。图 4(d)为完全封闭形态,这时负孔隙水压力已不存在,与饱和土的情况有些类似。但排出的液体为挟气水。挟气水的排出速度必然比纯水的排出速度慢。随着挟气水中含气量的减少,排出速度会逐渐变快,直到挟气量为零时达到饱和土的固结速度。因此在第三形态图 4(c)和第四形态图 4(d)之间,必有一消散速度最慢的状态,这正是两种气相形态的分界点,如图 5 所示<sup>[14]</sup>。

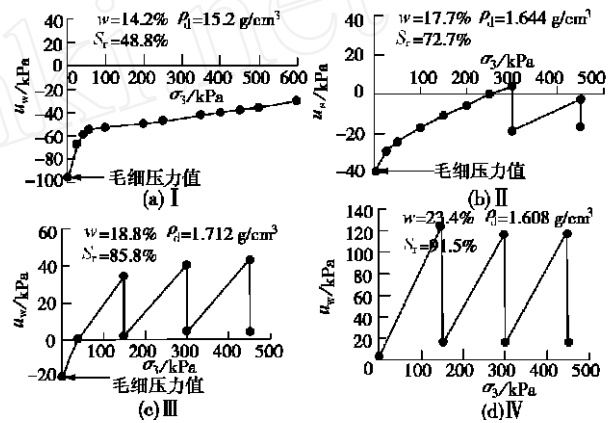


图 4 不同含水率试样的孔隙压力与周围压力关系曲线

Fig. 4 Relationship between pore water pressure and cell pressure

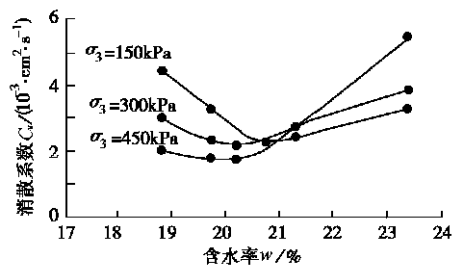


图 5 不同压力下消散系数与含水率关系曲线

Fig. 5 Curve of coefficient of dissipation vs water content (for the third and fourth phases)

从以上分析再次看到,非饱和土在不同含水率下,会表现出不同的固结速率、变形特性和强度特性。当研究非饱和土特性时,区别不同的气相形态,是进行针对性研究的必要前提。

### 1.2 非饱和土应力状态变量的研究

从 20 世纪 50 年代中期以来,许多学者相继提出了不少非饱和土的有效应力表达式,并进而建立了非饱和土的强度公式。然而由于非饱和土性质受固、液、气三相在细观上相互作用的影响,其问题远比饱和土复杂,因此至今尚无一个满意的结果<sup>[15]</sup>。

这类方程最早是在 1960 年的“黏性土抗剪强度会议”上 Bishop 提出的<sup>[16]</sup>,其式为

$$= (-u_a) + x(u_a - u_w) \quad (1)$$

他用一个系数  $\alpha$  来反映土中气相的影响, 并认为它必与土的饱和度(含水率)有关。但这个公式“既未从理论上加以论证, 也未从试验中加以检验”<sup>[17]</sup>, 因此受到不少学者的质疑<sup>[18]</sup>。

然而由于该公式简单明了, 且形式上与饱和土的有效应力公式相近, 因此不少学者仍乐意接受它, 并对该式进行了不少补充研究和解释工作, 以期对系数赋予一个明确的物理意义<sup>[12]</sup>。

依笔者看来, Bishop 公式中未能充分体现非饱和土中气相的存在对非饱和土的力学性质的影响, 因为气相引起的毛细现象、吸力和界面上的“收缩膜”(contractive skin)等现象的影响, 在该式中未充分考虑。Fredlund 和 Morgenstern 等认为: 一个单值的有效应力或应力状态变量不足以描述非饱和土的受力状态<sup>[19]</sup>, 他们提出了一个双应力变量公式, 并与库仑公式相结合提出了非饱和土的抗剪强度表达式:

$$\tau = c + (\sigma - u_a) \tan \phi + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

式中 第一个应力状态变量  $(\sigma - u_a)$  为净应力; 第二个应力状态变量  $(u_a - u_w)$  表示了因气相的存在而在水气交界面上形成的毛细吸力;  $\phi^b$  则是吸力引起的摩擦角。关于 Fredlund 的双应力变量理论, 有的学者对它的合理性进行过理论分析。陈正汉对非饱和土的应力状态研究表明, 无论对变形问题还是对强度问题, 用有效应力还是用应力状态的两种表述形式是相通的。双应力状态变量在理论上是合理的, 在应用上比有效应力方便灵活, 可适用于各种非饱和土<sup>[20]</sup>。

前文已强调指出, 非饱和土的不同气/水形态具有不同的力学特征, 相应地也应有不同的有效应力表达式。当研究非饱和土尤其是应力—应变关系和强度特征时, 必须首先指明所考虑的非饱和土处于何种气/水形态。

颗粒之间的胶结力和咬合力(有的称之为附加内应力或结构吸力)等也能增加粒间抗滑阻力, 但胶结力和咬合力与基质吸力和溶质吸力的性质是不同的, 它们的“变化规律及其影响因素应当分别地研究, 不能简单地合到一起”<sup>[12]</sup>。

### 1.3 有关吸力的讨论

吸力是非饱和土力学工程应用中的关键问题。巴西的 Willy Lacerda 等曾系统地叙述过非饱和土理论在不同类型工程中的应用, 他明确地指出: 控制非饱和土力学应用的控制因素是土的吸力, 吸力剖面取决于水的平衡。水的平衡不仅关系到蒸发和降雨, 也关系到所谓“土水平衡”<sup>[21]</sup>。吸力与土的力学特性的关系, 在膨胀土等特殊土中表现得尤为明显, 它的胀缩性质、固结和变形性质、抗剪强度以及土中水的运动等无不

与吸力有很大关系。

土的吸力是由土的毛细管特性、吸附特性和孔隙水中溶质的渗透性所决定的, 它可分为基质吸力和溶质吸力。对于一般的黏性土和砂性土来说, 基质吸力通常占吸力的主要成分, 且易随外界因素而变, 故它对工程影响较大。溶质吸力随含水率变化较小, 其值也比较稳定, 它与工程的关系远比基质吸力小, 只有对土中含水率和含盐量均较高的高塑性黏土, 溶质吸力才占有较重要的地位。因此工程中主要关心基质吸力的问题。本文中常提的吸力, 一般是指基质吸力。然而, 吸力的量测比较困难, 一般实验室和工程现场没有条件进行这类测定。少数具有专用设备的试验室也要求有技术精良的试验人员操作, 才能获得良好的成果。这样就限制了非饱和土理论的进展及其在工程中的应用。一个可行的办法就是研究吸力与其他较易测定的物理量的关系, 如土的饱和度、含水率、体积含水率等, 通过它来间接获得吸力。这个吸力与含水率的关系就是著名的土水特征曲线(SWCC)<sup>[11]</sup>。

为了解决吸力的难题, 有的学者提出过“广义吸力”的概念, 以便于计算<sup>[22]</sup>。

### 1.4 土水特征曲线(SWCC)及其工程应用

实验室测得的土水特征曲线常以半对数坐标表示, 它有吸湿曲线与脱湿曲线之分。本文仅讨论脱湿曲线问题, 图 6 是一种粉质黏土的典型 SWCC<sup>[23]</sup>, 曲线上有两个特征点 A\* 和 B\*。

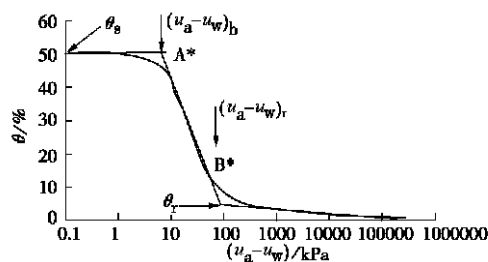


图 6 一种粉质黏土的典型的水土特征曲线

Fig. 6 A typical soil-water characteristics curve for a silty clay

按 Fredlund 等人分析, A\* 点称为进气值, 即当吸力增大到一定值时, 空气开始进入土体中。B\* 点称为残余含水率, 当土中含水率低到该值以后, 吸力会随含水率的微小变化而剧烈地增大, 但这时其工程意义已不是很重要了, 因为土体在含水率趋近或达到缩限时, 水的作用面积在土体中所占的比例已很小, 因此土体的体积变化已甚微了。而强度则因土体较大的吸力

龚壁卫, 詹良通, 刘艳华. 非饱和膨胀土的残余含水量与缩限的关系. 见: 第二次南水北调膨胀土渠坡稳定问题研讨会文集. 武汉, 1998, 8.

而具有很高的值。所以,上述两特征点之间的状态才是我们关心之所在,这与前面气水状态的分析是一致的。它们正是非饱和土气相的“部分连通形态”与“内部连通形态”所涵盖的范围。

土水特征曲线的数学表达式曾被一些学者所研究,Fredlund 等对这类表达式进行过汇总和归类(参看文献[2]表1)。这些公式多是拟合公式,适用于特定的土类,但据 Fredlund 和 A. Xing 的研究,考虑土的孔径分布曲线,用统计分析理论导出的公式认为可以适用于所有的土类<sup>[23]</sup>,其式如下:

$$\left( \frac{\theta}{\theta_s}, a, m \right) = c \left( \frac{s}{\theta_s} \right) \frac{1}{\{ \ln[ e + ( \frac{s}{\theta_s} / a )^n ] \}^m}, \quad (3)$$

$$c \left( \frac{s}{\theta_s} \right) = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{s}{\theta_s} / r)}{\ln(1 + 10^6 / r)}, \quad (4)$$

式中  $a, m, n$  为拟合参数,  $s$  为基质吸力,  $\theta$  为体积含水量,  $\theta_s$  为饱和体积含水量,  $r$  为残余含水量,  $r$  所对应的基质吸力值。

这个公式是对整条土水特征曲线而言的,无疑它仍十分复杂。如上分析,既然工程中最关心的是曲线的 A\*B 段,而该段又可看作半对数坐标上的直线,因此,笔者和詹良通等建议用简化公式<sup>[14]</sup>

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = p - q \lg(u_a - u_w) \quad (5)$$

来表达,其中  $p, q$  为拟合参数。这个简化表达式可直接用于工程中,并求得非饱和土的抗剪强度。有关该公式的详细情况,可参看文中所列的参考文献。

## 2 膨胀土特性的研究

### 2.1 膨胀土研究概况

我国膨胀土研究始于 20 世纪五六十年代。首先出现的工程危害是因膨胀土地基土胀缩而产生的房屋开裂和倒塌。当时的研究主要集中于膨胀土的分类鉴别、试验方法和变形特性等,在膨胀量和膨胀力及其影响因素方面有不少的研究成果<sup>[24]</sup>,这方面研究成果后来还有发展,并将膨胀力与吸力联系起来<sup>[25]</sup>。以后,膨胀土修筑的堤坝开裂的事故相继出现,故某些部门对于膨胀土的填筑标准、压实工艺等的研究曾予以关注,但随着研究的深入和工程问题的转化(如高层建筑的大荷重促使膨胀土地基的胀缩影响退居到次要地位等),人们的注意力更多地转到开挖边坡的安全上。因为大规模的铁路、公路以及大量水利工程的建设,引起的膨胀土(或称裂土)工程的失稳,使得边坡的稳定问题成为膨胀土研究中的重点课题。问题不仅在于这类工程事故数量多,危害大,而且也比一般工程问题复杂。

70 年代末期,非饱和土理论介入到膨胀土的研究中给膨胀土的研究以新的活力,有助于研究向机理和理论方面深入。同时吸引了更多的学者加入到这项研究的队伍中,有些产业主管部门(水利、铁道、公路等)还多次投入巨资,设立专项研究课题,取得了许多有用的成果,并对工程建设发挥了实际的作用<sup>[26]</sup>。

南水北调中线总干渠输水的保证率要求很高。100 多 km 长的膨胀土渠段是总干渠中的薄弱环节。为确保其安全运行,曾进行过长达几十年的研究工作,这些成果如能及时地用到工程上,将对增加总干渠的安全程度有良好的作用。

### 2.2 膨胀土的特性

#### 2.2.1 膨胀土的“三性”

膨胀土是常给工程造成麻烦的土,所以它被称为“难对付土”或“有问题土”。它的主要特征是“失水收缩、遇水膨胀”的胀缩性。膨胀土的胀缩性主要取决于蒙脱石(尤其是钠蒙脱石)的含量,因为蒙脱石具有最强的胀缩性,可以说蒙脱石是膨胀土具有特殊性质的主要物质基础。膨胀性可以表现为膨胀量,但在有一定荷重(约束)作用时部分膨胀量转化为膨胀力,两者都会导致上部或相邻建筑物的损坏或事故。影响膨胀性的因素除矿物成分外,还有它的微结构<sup>[27]</sup>。外在的最大影响因素则是水和与此相关的气候条件,土中水的移动又取决于土体中吸力分布剖面,以及有关的地面温度梯度、供水与失水条件和土的起始状态等,例如原状土的膨胀性与重塑土的膨胀性就有区别<sup>[5]</sup>。

除胀缩性以外,膨胀土另外两个重要特点是裂隙性和超固结性。膨胀土裂隙的产生是与胀缩性密切联系的。裂隙有原生裂隙与次生裂隙之分。由于大气的影 响,土体失水干缩产生的裂隙为原生裂隙,蒙脱石含量越多,原生裂隙也越发育。由于大气的影 响深度一般仅达土层表部 2 m 左右,故裂隙深度一般也在 2 m,最大可达 3~4 m。次生裂隙可能是由于膨胀土的坡体滑动时各点的位移不均匀,导致滑坡体扭转、局部隆起或形成叠瓦状的块体造成的<sup>[28]</sup>。此外,也可能是边坡开挖卸荷,应力释放造成的。由此认为,次生裂隙的产生往往与土体某种形式的不稳定相联系。这是一个值得注意的信号。

超固结特性通常是由于上覆土层的侵蚀而形成的,同时还有因次固结作用形成的和胶结物质的陈化形成的拟似超固结(压密)作用。这种超压密作用所储存的内部能量可能因卸荷而释放,也可能因水的长期饱和、淋滤或溶解而减弱,这样就会导致较大的水平位移或者强度的减弱,不利于土体的稳定。

上述的膨胀土“三性”对工程影响很大,但不同类



型的工程有不同的影响。例如,对房屋地基,胀缩性的影响最大。就本文所关心的土坡稳定而言,裂隙性是关键因素,胀缩性是产生裂隙的内因,而超固结性则是促进因素。胀缩性和超固结性的影响,在一定程度上是通过裂隙性作为载体表现出来的。因此研究膨胀土边坡的稳定性必须着重研究它的裂隙及其影响。

有关裂隙方面问题,以往曾有不少人指出过它的重要性<sup>[26,28]</sup>,但大多限于定性描述,定量的研究尚不多见。本文将简要地介绍近期在定量方面的一些探索。

## 2.2.2 南水北调中线南阳膨胀土特性的试验研究

### (1) 试验的目的和内容

南阳膨胀土的特性在 80 年代也曾进行过研究。本次试验的目的是为了研究非饱和膨胀土在不同应力路径(吸湿、加压和剪切)下,尤其是现场降雨入渗应力路径下的水力和力学性状,以期为本构模型的建立提供基础,并为模型参数的确定提供资料。试验是在香港科技大学土木系和长江科学院土工所分工合作下进行的,詹良通、龚壁卫和袁俊平等完成了这些精细的试验工作<sup>[5,29,6]</sup>。试验土样取自中线总干渠附近的枣阳膨胀土地区,土样属中等塑性的粉质黏土,呈褐色,具有中等膨胀性。试验结果将在下文简述。

### (2) 试验的主要结论

#### a) 土水特征曲线(SWCC)试验

土水特征曲线试验按美国的材料测试规程(ASTM,2000)建议的方法进行,试样的起始状态是饱和的。原状样和重塑压实样的 SWCC 示于图 7。从中看出,重塑压实样在进气压力值(25 kPa)前,一直基本维持饱和,然后饱和度急剧地下降,而原状样在低吸力时饱和度即开始降低,但较缓慢。这主要与两种试样在饱和后的孔隙比差别有关。

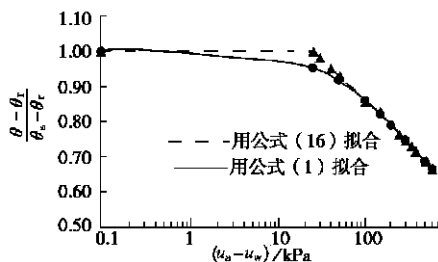


图 7 南阳膨胀土原状样的土水特征曲线

Fig. 7 SWCC for Nanyang expansive undisturbed clay

#### b) 膨胀试验

众所周知,膨胀土因吸湿而引起的膨胀是起始吸力(或起始含水率)、起始干密度和外加应力的函数,而膨胀压力还取决于所加的应力路径<sup>[30]</sup>,故笼统地谈论膨胀土的膨胀量或膨胀力问题是不妥当的。

图 8 显示了不同初始含水率试样的单向浸水膨胀

试验成果,其中还比较了不同干密度的影响。

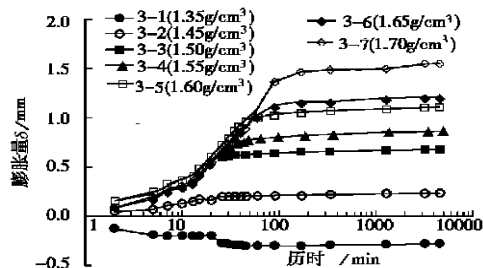


图 8 单向膨胀试验的膨胀过程线 ( $w_0 = 12.23\%$ )

Fig. 8 Variation of swelling value measured by 1-D swelling test

可以看出,土体含水率越低,最终膨胀量越大。在相同的含水率下,初始干密度越大,最终膨胀量也越大。同时还可看出,膨胀过程线呈 S 形,该线可分为三个阶段:吸水膨胀阶段、快速膨胀阶段和缓慢膨胀阶段<sup>[6]</sup>。

#### c) 吸力对抗剪强度的贡献

吸力对非饱和原状样和重塑压实样强度的贡献示于图 9(a), (b) (由非饱和直剪试验得到)<sup>[5]</sup>。图 9(a), (b) 显示了拟凝聚力 (apparent cohesion) 与吸力的关系,图 9(b) 显示了吸力引起的摩擦角  $\phi_b$  与吸力的关系。

从图 9(a) 可以看出,两种土样的拟凝聚力均随吸力的增加而显著增加,特别是在 0 到 100 kPa 吸力范围内。从图 9(b) 可以看出:与重塑压实样相比,原状样具有较大的内摩擦角  $\phi$ ,因此在吸力较低时(小于 100 kPa)具有较大的  $\phi^b$  值,但随着吸力的增加  $\phi^b$  迅速降低。这可能与在原状样中的裂隙有关。另外,控制吸力的非饱和土三轴试验结果还表明内摩擦角与吸力的关系不很敏感<sup>[5]</sup>。因此,吸力对强度的贡献主要表现在拟凝聚力的变化上,这与以往一些研究成果的结论是一致的<sup>[31]</sup>。

#### d) 应力路径对非饱和土强度特性的影响

等偏应力下的吸湿试验可以模拟边坡中非饱和土降雨入渗时的应力路径。詹良通采用自动控制应力路径三轴仪分别对非饱和原状样和重塑压实样进行了三个不同应力比 ( $q/p$ ) 下的吸湿试验。试样的吸湿(降低吸力)是在控制偏应力和净平均应力为常数的条件下进行的<sup>[5]</sup>。其成果如图 10。

从图 10 可以看出:各轴向应变—吸力关系曲线均存在一个吸力的门槛值。当大于此门槛值时,因吸力减少引起的轴向应变很小;一旦吸力降低到此门槛

包承纲. 关于“膨胀土边坡的稳定问题”. 见:南水北调膨胀土渠坡稳定和早期滑动预报研究论文集. 武汉, 1998. 46 - 57.

包承纲, 刘特洪. 豫西南膨胀土的工程特性和渠道边坡的稳定问题. 见:非饱和土理论与实践学术讨论会文集. 北京:中国土木工程学会土力学与基础工程学会, 1992.

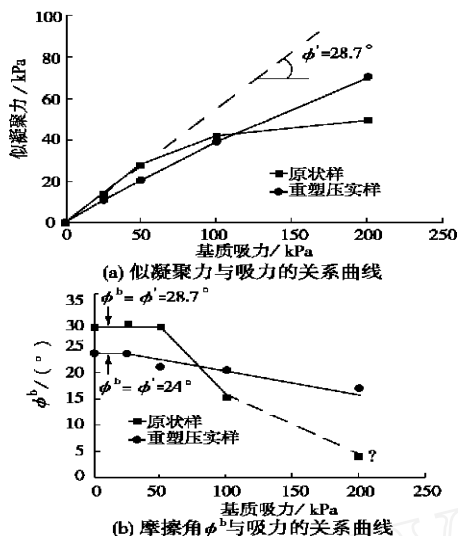


图 9 吸力对强度的贡献

Fig. 9 Shear strength vs suction for nature and recompacted soil

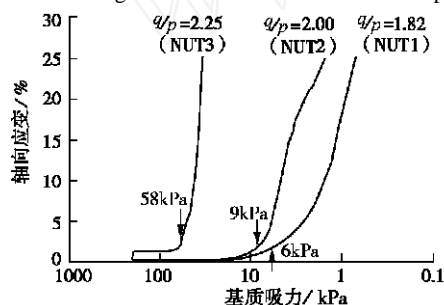


图 10 非饱和土原状样的轴向应变与吸力关系

Fig. 10 Variation of axial strain with suction  
(constant- $q$  wetting test)

值,轴向应变急剧增加,试样很快就发生破坏。若将试样的破坏点定在轴向应变的 20 % 处,则破坏时的吸力值随应力比的增大而降低,对应于  $q/p = 2.25, 2.0, 1.82$  的吸力值分别为 33, 3, 1 kPa。根据破坏时的应力点按公式 (2) 可计算得到吸力对抗剪强度的贡献(即  $(u_a - u_w) \tan \phi^b$ )。将此计算结果绘于等吸力直剪试验获得的似凝聚力与吸力的关系曲线上(图 11), 可以看出,等偏应力吸湿试验结果与等吸力直剪试验结果是一致的。由此可以认为,原状样的抗剪强度可能与应力路径无关的。重塑压实样的类似试验也得出了同样的结论<sup>[5]</sup>。

e) 饱和度和裂隙度对南阳膨胀土强度特性的影响

研究表明,在自然风干条件下,当土体饱和度较高时,饱和度是影响非饱和膨胀土强度的主导因素,裂隙发展所引起的强度衰减可由饱和度的变化来反映,此时裂隙的发展对应着饱和度的降低,当饱和度较低时,在饱和度变化不大的情况下,裂隙会有较大的发展,裂隙对非饱和膨胀土强度影响占较主要地位,此时裂隙

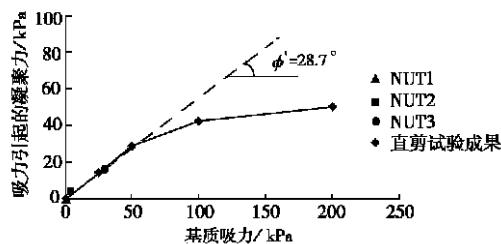


图 11 等  $q$  加湿试验和等吸力直剪试验成果的比较

Fig. 11 Comparison of results from constant- $q$  wetting tests and constant suction direct shear tests

发展对土体强度的影响必须单独考虑<sup>[6]</sup>。应当指出,上述试验是在自然风干单一因素条件下进行的,实际上,土体的裂隙还会受地震,土体卸荷,不均匀沉降等众多因素的作用而继续发展,因此,裂隙对非饱和膨胀土强度的影响不管其饱和度如何均应独立考虑。这点在下面还会提及。

### 3 膨胀土边坡的稳定问题

#### 3.1 膨胀土边坡滑动的特征和分类

膨胀土地区边坡的滑动,依不同的角度可以有不同的分类,铁路部门根据滑坡的结构面分为,层间结构面、风化界面和裂隙结构面三种滑坡类型,也有的只分为层间结构面和裂隙结构面的<sup>[26]</sup>。

根据现场调查,膨胀土滑坡具有浅层性、渐进性和长期性。浅层性即膨胀土滑坡的深度一般仅 2 m 左右,最深也不过 4 m。这是与裂隙的开展深度和受气候影响的风化深度有关的。滑坡过程的观测表明,滑动时水平向的变形在底部及坡腰处位移大,坡顶部位较小,因此,滑坡往往从底部首先开始,因为那里是应力集中区。滑坡的发展是从底部向上发展,逐渐形成渐进性滑坡。滑坡的长期性是与膨胀土裂隙的发育过程、膨胀土的软化过程和蠕变的发展等因素相关的。这种过程可持续几个月、几年、甚至几十年。因此一个工程在使用三四十年后出现破坏是一点不奇怪的<sup>[28]</sup>。

#### 3.2 膨胀土边坡失稳机理和降雨入渗的现场试验

##### 3.2.1 降雨入渗的现场试验

###### (1) 缘由与概况

众所周知,降雨入渗是膨胀土边坡失稳的关键因素之一,弄清入渗过程中,膨胀土各种特性的变化和土体内应力分布的调整情况对认识失稳机理是不可缺少的。以往有人在这方面做过工作<sup>[28,32]</sup>,但尚需深入。

最近几年,有些学者对残积土和膨胀土等边坡失稳进行过专门研究。表明,降雨诱发滑坡的主要原因是土体中的吸力(或负孔压)的降低,甚至丧失,从而导致了土体抗剪强度的降低<sup>[32,33]</sup>。但膨胀土的特性对非



饱和膨胀土边坡在降雨入渗条件下稳定的影响机理,尤其是水分、孔隙水压力、应力状态、土体变形和土体的物理状态等的影响机理,迄今尚不很清楚。

香港科技大学与长江科学院在吴宏伟 (C. W. Ng)、Fredlund 和笔者的指导下,在南水北调中线渠道工程附近的湖北枣阳(属南阳膨胀土同一地质单元)的现有渠道中,选取了一个 11 m 高(31 m 长 ×16 m 宽)的膨胀土渠道边坡上进行人工降雨模拟试验和多种仪器的原位综合监测。试验场地开挖边坡角为 22°,该处土层是棕黄色的硬黏土,主要矿物为伊利石、蒙脱石和高岭石。土层的天然含水率除表面 1 m 左右比较小以外,其余均接近土的塑限( $w_p = 20\%$ ,  $I_p = 30$ )。表层土具有明显的超固结特性,土体的膨胀力在(30~200) kPa 左右。近地表 1.5 m 土层内裂隙发育。在试验场地附近,曾发生过若干个大小不等的滑坡。

(2) 试验和观测的内容

在试验区区内共设了三个监测剖面,每个剖面有 7~9 个吸力探头和 4 个含水率探头( - probe),大部分仪器埋在 2.0 m 深度以内,除测吸力和含水率外,还布置了 3 对土压力盒,以及用于测量水平位移的测斜管,测量竖向膨胀的沉降标、自动雨量计、蒸发皿等仪器。人工降雨是用一个专门设置的喷洒系统来实现的,可以产生三个等级的降雨强度,即分别为每小时 3,6,9 mm。

在一个月的正式观测期间,共进行两场人工降雨,第一场历时 7 d,日降雨量 62 mm,第二场历时 2 d 多,每小时降雨量均保持在 3 mm。降雨量与入渗率的情况如图 12 所示<sup>[34]</sup>。可以发现:第一场降雨的头 1.5 d 入渗率为 100%,以后逐渐减小,4 d 后降到一个相对稳定值(30%),即 70%雨量变为径流;第二场降雨头半天入渗率为 100%,2 d 后降到 35%。入渗率随降雨历时的增加迅速减少可能是与土层中裂隙的逐渐闭合有关的。

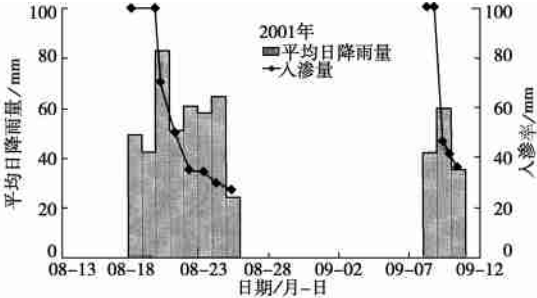


图 12 降雨强度与入渗百分比的关系

Fig. 12 Intensity of rainfall and percentage of infiltration

(3) 试验成果分析<sup>[34, 35]</sup>

a) 入渗对吸力的影响

图 13 为不同深度中测得的吸力随时间变化过程线。由图可见,表层 0.6 m 处吸力的变化最大,降雨 1.5 d 后迅速由原来的最大值降至 0。这种现象在浅层土层中较深部位的土体表现得尤为明显。图 14 所示的吸力沿土层深度的变化情况证实了这一点。雨停二星期后,2.0 m 以内土层的负孔隙压力开始恢复。表层土体(一般 2.0 m 以内)对降雨入渗的敏感性是导致膨胀土边坡浅层滑动的主要原因之一。边坡土体中含水率的变化呈现与吸力变化的相似规律<sup>[35]</sup>。

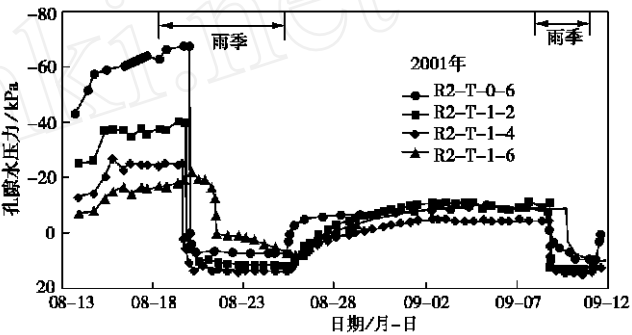


图 13 坡中部各深度处的孔隙水压力或吸力反应曲线

Fig. 13 Response of the suction sensors located at mid-slope

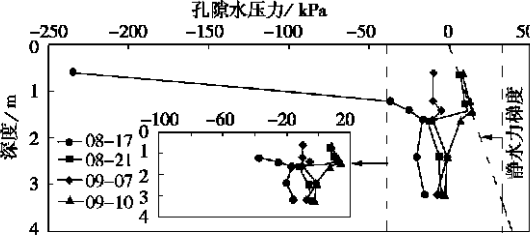


图 14 孔隙水压力变化曲线

Fig. 14 Variation of pore water pressure

b) 入渗对土体应力状态的影响

土体中的水平应力是由土压力盒测得的。结果如图 15 所示。埋于 1.2 m 深的土压力盒测值表明,水平向土压力在降雨 1.5 d 后开始反应,并逐渐增大。这是膨胀土内存在着膨胀势的表现。由于土体受到侧向约束,故吸水后膨胀量不得发挥而表现为膨胀力。观测结果表明,垂直于坡向(东西向)水平应力明显高于顺坡向(南北向)的值,这与垂直于坡向土体的约束强于顺坡向土体的约束有关的。从图 15 可见,水平应力与垂直应力的应力比在降雨 2~3 d 后迅速增大,然后增大速率减缓而逐渐趋于稳定。若将测得的最大应力比(2.7~3.2)与用朗肯临界土压力理论所得的极限状态应力比做比较,并采用南阳膨胀土的有关指标<sup>[35]</sup>,计算得极限被动土压力系数为 2.0~3.1,它与图 15 所示的值相近。说明雨后该处的土体可能会沿裂隙而发生被动破坏。因此膨胀土在雨后水平应力的

增加,也是导致土体滑坡的主要原因之一<sup>[34,35]</sup>。

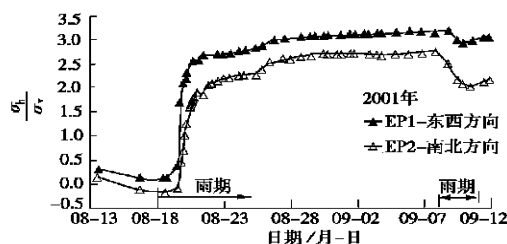


图 15 坡中 1.2 m 深度处水平应力与竖向应力比对降雨的反应曲线

Fig. 15 Variation of the total stress ratio ( $\sigma_h/\sigma_v$ ) in a depth of 1.2 m at mid-slope

### c) 入渗对土体变形的影响

**水平位移** 图 16 中显示了埋在坡中的测斜管在向坡下方向和东西方向(垂直于坡向)土体水平位移的情况。从中可见,土层深度在 1.5~2.0 m 以内的水平位移比其下土体的值要大得多,这与孔压和含水率沿深度的变化规律是一致的。在入渗的过程中,裂隙周围的土体因吸水而膨胀,使裂隙逐渐闭合,渗透性随之降低至完整土体的渗透系数,所降的雨量在降雨 4 d 后有 70% 变为径流,仅有少量的雨水入渗。因此本次试验所模拟的高强度、短历时的降雨强度并没有对边坡的整体稳定造成很大的影响。可以推测,在降雨总量相同时,强度小历时长的降雨可能对边坡稳定更为不利<sup>[34]</sup>。

**膨胀隆起** 土体的膨胀也同样存在一定的滞后,滞后的时间随深度的增加而增长,如图 17 所示。

膨胀量则随深度增加而变小,坡面的上部测得的最大膨胀量为 31 mm。还应指出,膨胀的发展要持续一定的时间,这可能与非饱和土体从周边的裂隙中继续吸取水分有关。土体吸水膨胀将使土体软化,抗剪强度降低,不利于边坡的稳定。

### 3.3 裂隙的定量研究和裂隙对土的渗透和强度的影响

前文已强调,影响膨胀土边坡稳定的关键因素之一是它的裂隙性,要研究如何避免膨胀土地区边坡的滑动,必须弄清裂隙是如何影响边坡稳定的。

关于这方面的研究最近袁俊平在殷宗泽教授和笔者的指导下对膨胀土裂隙问题作了比较系统的定量研究,提出了非饱和膨胀土裂隙的概化模型、裂隙的度量指标和量测方法、裂隙随土体水分变化的发展与愈合、裂隙存在对土体渗流和强度的影响等问题的研究成果,并在边坡稳定分析中考虑了裂隙存在的计算方法<sup>[16]</sup>。

#### 3.3.1 裂隙的度量指示和量测方法

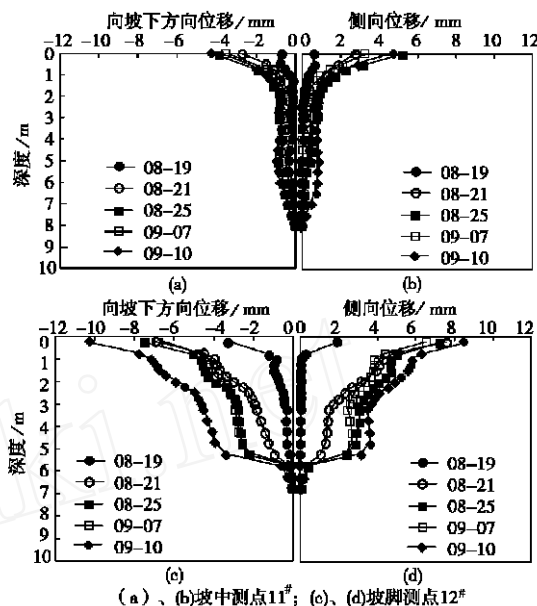


图 16 水平位移对降雨的反应(东-西)

Fig. 16 Horizontal displacement in response to rainfall (E-W)

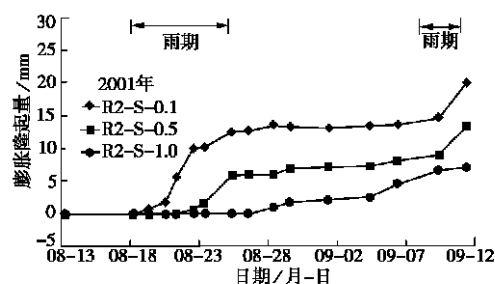


图 17 坡中各深度处的沉降标测得的竖向位移随时间的变化

Fig. 17 Changes of vertical displacement with time at mid-slope

为了表示裂隙各要素(走向、倾角、宽度、长度、深度、间距、裂隙面的光滑度等)的综合影响,整体上反映裂隙的分布特征,可采用“裂隙度”这个综合指标。并建议以图象灰度作为“裂隙度”的定量指标。采用室内光学图像的分析观测方法,对从现场取回的土样进行重塑制成半园柱样,并在自然条件下逐渐干裂,测得该土样的图像灰度,从所得的图像灰度可以显示裂隙的发展。当裂隙不发育时,图像灰度较多集中于某一灰度值附近,图像比较均匀一致,当裂隙较发育时,图像的灰度逐渐分散,如图 18,19。

由此引入灰度熵的概念来代表灰度的均匀与离散情况,其定义如下:

$$D_f = - \sum_{i=0}^{N-1} P_i \lg_2 P_i, \quad (6)$$

式中  $P_i$  表示第  $i$  级灰度出现的频率,  $N$  为图像的灰度级别,在本例中  $N = 256$ 。灰度熵综合地反映了裂隙的宽度、长度、分布疏密程度等,可作为裂隙发育程

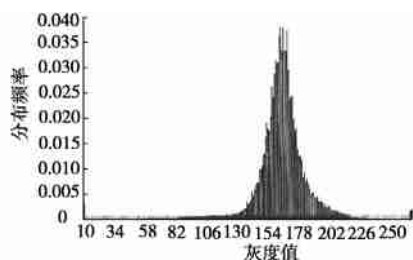


图 18 初始裂隙图像灰度分布

Fig. 18 Gray level distribution of picture in initial fissure-free state

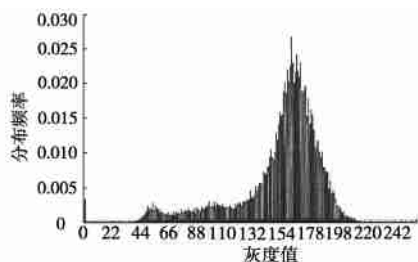


图 19 裂隙发展后图像灰度分布

Fig. 19 Gray level distribution of picture after fissure expansion

度的度量指标。

现场观测表明,裂隙网络的发育深度与大气影响深度相当,约为 2~3 m。裂隙的分布是随机的,个别土样裂隙的状况不具有普遍的性格,为此,必须把土样裂隙的样本概化为裂隙网络模型。该裂隙网络模型可用统计数据特征值,运用蒙特卡罗法进行模拟,详细可参考文献[6]。

### 3.3.2 膨胀土的浸水膨胀规律和裂隙浸水闭合的计算

膨胀土的最终膨胀量  $w_{\max}$  与初始含水率  $w$ 、干密度  $d$  呈直线关系,并可表示为

$$w_{\max} = a_1 + b_1 d + c_1 w_0. \quad (7)$$

土体从开始浸水到膨胀的历时  $t_0$  可表达为

$$\lg t_0 = a_2 + b_2 d + c_2 w_0. \quad (8)$$

包含裂隙的膨胀土在浸水或渗透过程中,裂隙会逐渐地闭合。由于裂隙的渗透性比膨胀土体的渗透性大,故裂隙中将较快地充满水,而裂隙两侧的土体则处于单向浸水膨胀的条件下,故可以用单向浸水的膨胀量来计算裂隙随时间的闭合规律。研究裂隙的浸(吸)水闭合,对于膨胀土整个土体渗透性的变化、软化程度的估算和强度参数的测算都有用处,具体的计算方法可参考文献[6]等。

### 3.3.3 裂隙对土体强度的影响研究

裂隙的存在使非饱和膨胀土的强度复杂化了。考虑裂隙的影响可以把强度区分为整体土块强度(不包含裂隙的土体强度)、沿裂隙面的强度、沿滑动面的强

度和土体强度(包含裂隙的土体整体强度)<sup>[26]</sup>。其中,沿裂隙面和沿滑动面的强度,它的面上已有部分颗粒定向或高度定向,甚至可能已达残余状态<sup>[36]</sup>。除此以外,按荷载情况,还有瞬时强度、反复加卸荷强度、反复剪切强度和长期强度之分,它是与裂隙的存在和发展密切相关的。这些强度对应着工程不同的运用条件。

为了研究非饱和膨胀土强度与裂隙度之间的规律,进行了不同裂隙发育程度(不同裂隙度)的三轴剪切试验,并发现如下规律:

1) 非饱和膨胀土裂隙度随饱和度的增大而减少,但土体的强度随饱和度的降低逐渐提高。然而当饱和度降低到一定程度后,土体强度反而下降,如图 20 示。这是因为当土体饱和度较低时,饱和度的微小降低会引起裂隙较快的发展。此时裂隙对强度的影响将强烈地显现出来,且占主导地位。同时,此时的土体变得较“脆”(破坏应变变小),其他受力条件的变化(如卸荷、地震、差异沉降等)也会促使裂隙发展。这样,裂隙的发展不仅受含水状态的影响,也受多个因素的影响,故强度大为削弱了。在其他学者的研究中也有类似的现象<sup>[12,13]</sup>。

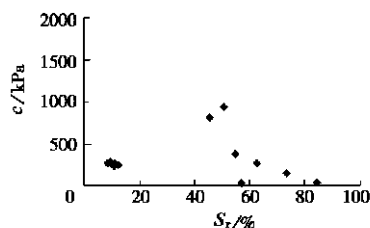


图 20 非饱和裂隙膨胀土凝聚力随饱和度变化

Fig. 20 Variation of apparent cohesion with degree of saturation for expansive clay

2) 土体强度指标与饱和度、裂隙度的关系可用下两式表示:

$$c = a_3 + b_3 S_r + c_3 D_f, \quad (9)$$

$$\tan \phi = a_4 + b_4 S_r + c_4 D_f. \quad (10)$$

对于所试验的南水北调中线渠道上的褐黄色夹灰白蒙脱石的膨胀黏土,其拟合的成果与试验值有良好的相关性<sup>[6]</sup>。

### 3.3.4 考虑裂隙的非饱和膨胀土边坡稳定分析

有关膨胀土边坡稳定问题的文献不少<sup>[37,38,39]</sup>,但考虑裂隙影响的比较少。本文讨论的方法也是初步的。

缪林昌,殷宗泽,仲晓晨. 非饱和膨胀土的强度与含水率的关系. 见:南水北调膨胀土渠坡稳定和滑动早期预报研究论文集. 武汉:长江科学院,1998. 123 - 127.

这里所考虑的稳定分析方法也是就非饱和膨胀土处于气相的第二形态和第三形态而言的。膨胀土边坡稳定分析方法一般有静力平衡分析法、统计比较判别法或工程地质对比法和有限元分析法。在上述方法中,定量地考虑裂隙影响的方法仅有少量报导<sup>[40,41]</sup>。王文生在他的学位论文中提出了一种裂隙材料等效法来考虑裂隙的影响<sup>[42]</sup>。袁俊平的研究成果是以有限元法为基础发展的,其思路有二:一是首先用有限元方法计算土坡中的应力分布,将应力水平较高的点连起来作为计算的潜在滑动面,该面上各单元沿滑动方向的剪应力总和与抗剪强度总和的比值,作为安全量度指标;二是对抗剪强度指标进行一定折减,或将荷载放大,计算此时的土体变形量,若变形量已与折减倍数基本无关时,即认为土体已经失稳,此时的折减系数(或放大系数)即为安全系数,该法尚需进一步验证。

对于裂隙的模拟也采用两种方法:一是对裂隙发育程度较高的膨胀土,将裂隙影响均化在土体中,即将强度指标按完整土体的强度进行一定程度的折减,强度值的计算可参照近似公式(式(5))采用。另一是若裂隙的分布呈现明显的方向性,即应考虑土的各向异性,则可采用裂隙元(可设为有厚度的薄单元)模拟裂隙的强度特性,强度值可取裂隙面的试验值。

有了上述的基础,可以导出考虑裂隙影响的边坡稳定分析方法,并编制程序 UCFEM,结合现场试验和降雨入渗的研究,即可求得非饱和膨胀土边坡在各种条件下,尤其是降雨入渗条件下的稳定状况<sup>[5,6]</sup>。

### 3.4 膨胀土边坡失稳机理分析

从上面的叙述可以对边坡失稳机理作如下分析。

(1) 降雨入渗对非饱和膨胀土边坡的直接影响是使得边坡土体中(特别是浅层土)吸力降低或孔隙水压力升高。孔隙水压力的升高使“有效应力”降低,从而导致土体抗剪强度降低。从枣阳膨胀土的控制吸力直剪试验结果看出:如果土体中的吸力从 100 kPa 降至 0 kPa,其抗剪强度将减少约 40 kPa。另外,吸力的降低将使得原来非饱和土层在竖向发生膨胀,如图 18,土体因膨胀而发生软化,也将导致土体抗剪强度的降低。因此,降雨入渗的吸力降低对非饱和膨胀土的影响是双重的,它是降雨诱发膨胀土边坡失稳的主要原因之一。

(2) 在侧向约束条件下,非饱和膨胀土吸水(或吸力降低)后的膨胀趋势就以膨胀力的形式表现出来。膨胀力的形成将导致边坡土体中水平向应力增加。从图 16 可看出:降雨入渗后,土体中的应力比( $\sigma_h/\sigma_v$ )显著增加(这表明土体内剪应力增加),且用朗肯极限土压力理论计算得到的极限状态下的应力比很

接近。这说明降雨入渗后,局部土体有可能产生破裂面,并可能最后发展成为膨胀土中常见的渐进式滑坡<sup>[23]</sup>。可见降雨入渗引起的膨胀土体内应力比的增加可能是触发边坡失稳的又一个重要原因。

降雨入渗造成的土体膨胀软化和土体中水平应力的增加是与非饱和膨胀土的胀缩性相关的,因此是膨胀土边坡所特有的。同时,胀缩性又与裂隙的发展密切相关,而裂隙又会加剧雨水入渗的作用。这些因素的互相影响必然会使膨胀土边坡滑动频繁地出现。

(3) 雨水入渗还会使土中的胶结物质软化,结构性丧失,土的强度降低,也不利于土体的稳定。

### 3.5 膨胀土边坡稳定研究的基本思路

边坡稳定研究中的基本问题应包含两方面:一是内外各种因素的变化对膨胀土状态的影响,尤其是土的密度、含水率以及某些特性指标(如抗剪强度指标)的影响;二是外在的荷重、气候和各种因素作用下,膨胀土产生的应力和变形的大小及其影响。这两方面的问题都与水的因素直接相关。

#### 3.5.1 对非饱和膨胀土特性的认识

膨胀土对于我国工程界和学术界来说并不陌生。对它的特性已有相当的了解,在处理因膨胀土引起的工程事故上也有了一定的经验。但近几年来,由于对其研究的深化,故对它的特性和滑动机理的认识又有了一些进步,这些认识概括起来主要有如下几点。

(1) 膨胀土是一种很典型的非饱和土,因此吸力对它的性质影响极大。由于吸力与非饱和膨胀土中的强度密切相关,因此,它是研究膨胀土工程性状的中心问题之一,在强度或变形问题的研究中均不可忽视。

(2) 非饱和膨胀土受土中水、气含量的相对比例不同的影响而呈现出不同的性状,在研究中必须首先明确所研究对象的气/水状态。

(3) 由于吸力量测的困难,在工程中可以通过土水特征曲线(SWCC)的测定来间接获得吸力的影响。吸力与含水率在一般情况下存在着对应的关系,但增湿路径与减湿路径对应着不同的土水特征曲线。

凭借 SWCC 的成果,可以导出非饱和膨胀土的强度简化表达式,以便于工程实践中应用。

(4) 膨胀土的主要成分为黏土矿物,大量蒙脱石的存在会给膨胀土带来高胀缩性、强亲水性、易开裂、强度变化很大等特殊性状。土中的胶结物质的陈化会使膨胀土具有结构性。这种结构性会随着土中水分增大逐渐丧失,导致土体软化和强度降低。含水率对非饱和膨胀土性状的这种双重影响是导致边坡雨后失稳的主要因素。

(5) 在降雨入渗过程中膨胀土边坡的反应及其性

状和土中应力状态的演变,已为大型现场人工降雨模拟试验所揭露,试验表明,在边坡的浅层起始吸力越高的地方,反应越剧烈,这也是膨胀土边坡常发生浅层滑坡的主要原因之一。

(6)膨胀土边坡的表层常因气候的影响而存在着发育的裂隙(fissures)和裂缝(cracks),它们是降雨入渗的方便通道。裂隙的存在是膨胀土边坡稳定的控制因素之一,但以往少有定量研究。从近来的定量研究表明,裂隙可使非饱和膨胀土总体的强度值降低 60 % ~ 70 % 左右<sup>[25]</sup>。雨水首先通过裂隙入渗,使裂隙面及其附近的土体产生复杂的吸力变化和体积变化过程,这个机理也已作了初步的定量研究<sup>[6]</sup>。应当注意,裂隙主要发生在土体的表层 2.0 m 左右,较深部的土体裂隙较少。同时,土体降雨后的饱和软化主要也是在表层,即使在降雨的整个过程中该处土体也不一定会达到完全饱和状态<sup>[43]</sup>。由于膨胀土边坡的滑动常具有浅层性、牵引性和滞后性,因此若按现有常规的饱和土边坡稳定分析思路来核算并未处于完全饱和状态的膨胀土边坡,对于浅层土体不够安全,而对深部土体则过于保守。

### 3.5.2 膨胀土边坡稳定研究的“双链图”

根据以上认识,可以对膨胀土边坡稳定性的预测预报提出下列的“双链”框图<sup>[4]</sup>,如图 21。右链是膨胀土本身的特性因内外各种环境因素的影响而发生的密度、含水率以及应力应变强度特性(包括抗剪强度)等的变化;左链是外在荷载和其它因素影响下膨胀土的吸力和应力的变化,这两方面的问题都与水的因素直接相关。

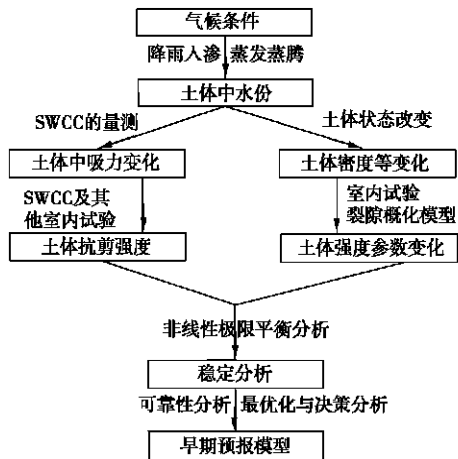


图 21 膨胀土边坡稳定早期预报系统“双链”框图

Fig. 21 Double-Chain chart of warning system for slope stability

## 3.6 考虑裂隙和入渗影响的边坡稳定分析实用方法算例

### 3.6.1 概况

在本节中,以南阳地区一个渠道边坡的试验段为例进行边坡在考虑吸力与不考虑吸力情况下的稳定分析<sup>[11]</sup>。在计算的条件和参数的选择上考虑了裂隙和入渗的影响。

所选择的计算断面高 12 m,边坡 1:2.5。土层从上到下分为两层:上层为厚 4 m 的灰褐色黏土,有裂隙;下层为黄色黏土,裂隙发育,有灰白色蒙脱石充填。土体的饱和度在 60 % ~ 90 % 之间,表明非饱和膨胀土的气相形态属于部分连通与内部连通的形态,符合本文研究的范围。

### 3.6.2 计算条件及参数

计算中的吸力剖面最好是根据现场雨后实测吸力分布取用。由于该处未测定吸力数据,故参考本文人工降雨现场试验所得的规律,作一定的简化假定,所采用的吸力剖面如图 22 所示。

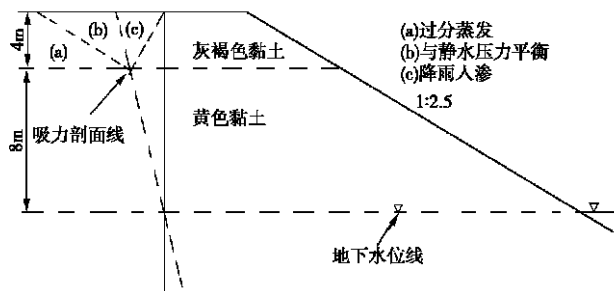


图 22 渠坡吸力剖面示意图

Fig. 22 Assumed soil suction profile in the calculated slope

由于大气的影响深度一般为 2 m,最大达 4 m 左右,而该影响深度内的吸力分布可简化为三种典型情况:属干燥无雨的情况;属降雨入渗情况;前两者之间的吸力与静水压力平衡的情况。三种情况的吸力随深度变化均假定按直线分布(如图 22)。

非饱和土的强度可考虑由净正应力 ( $\sigma - u_a$ ) 引起的强度与吸力引起的强度两部分叠加,净正应力 ( $\sigma - u_a$ ) 引起的强度指标是根据滑面上有 62 % 是沿原裂隙面滑动的,因此它的强度参数是根据滑动面强度的反分析结果取值的。而吸力引起的强度分量则采用笔者建议的简化公式<sup>[14]</sup>  $u_s = (u_a - u_w)(p - qlg(u_a - u_w)) \tan \phi$  计算的。将该项强度计入土的总凝聚力中,比较方便。

在计算中还考虑了降雨或蒸发对土的密度的影响,影响系数根据观测和经验取值。为简单见,计算方法仍采用极限平衡法,可以得出习惯上常用的安全系数值,以便比较。

### 3.6.3 计算成果

考虑三种吸力分布及按常规(不考虑吸力)的边坡稳定分析结果列于表 1。

表 1 考虑三种吸力分布的边坡稳定分析结果

Table 1 The results of slope stability analysis under different distribution of suction

剖面位置	土体的强度指标		裂隙或软弱面的强度指标		滑面的强度指标		稳定安全系数 $F_s$				
	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\text{^\circ})$	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\text{^\circ})$	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\text{^\circ})$	不考虑吸力	考虑吸力			
								与静水压力平衡	降雨入渗	干燥	
B 试段	上层	20	14	11	11	5	11	0.79	1.17	0.99	1.42
	下层	17	11	8	11	4	10				

从上述结果可以看出,考虑吸力比不考虑吸力会使  $F_s$  提高 30 % ~ 40 %,而且当不考虑吸力时,边坡是不稳定的,当考虑吸力时,边坡则基本稳定,只是在降雨入渗条件下,边坡达到临界安全状态,很可能会失稳。这些结果反映了吸力的重要作用,由此可见,吸力对边坡稳定性的贡献不可忽视。

至于浅层(0 ~ 2 m 或 0 ~ 4 m)土层的稳定情况,不难推断,当雨水快速入渗时,裂隙相邻的土体发生软化,吸力急剧降低,甚至使负孔压变成正孔压时,表部发生浅层溜坍的可能性很大。对于这种失稳的情况,应另作分析。

4 结 语

膨胀土作为一种典型的非饱和土,吸力对它的特性具有十分重要的影响,因此非饱和土的理论引入膨胀土边坡稳定研究中是必要的,它有助于膨胀土研究的深化和理论化,使有关分析和计算更加符合实际。

本文对非饱和膨胀土中的新进展作了扼要的叙述,其中气水形态的研究、降雨入渗的机理和分析方法、裂隙对边坡稳定影响的定量研究、非饱和裂隙膨胀土的强度变化规律等重要的关键技术问题已有比较清楚的认识。建立在这些认识基础上的边坡稳定分析方法和滑坡防治措施将更有依据,也更符合实际情况。

由于非饱和膨胀土问题的复杂性,研究的条件要求较高,研究的难度很大,有许多问题尚需进一步深化和细化。需要指出的是,膨胀土边坡失稳常会造成重大的损失,本文建议的有关早期预报的“双链”框图,可以在今后工作中进一步研究,以期实现事先预警预报的目的,减少生命财产的损失。

感谢:本文引用了不少 C. W. W. Ng 教授、Fredlund 教授、刘特洪高工、龚壁卫高工、詹良通博士、袁俊平博士等的研究成果,尤其是詹良通博士,他不仅对全文提出了宝贵意见,而且还提供了某些段落文字资料,谨表感谢!

参考文献:

[1] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils [M]. John Wiley & Sons INC, 1993.  
[2] Fredlund D G. Bringing unsaturated soil mechanics into engineer-

ing practice[A]. Proc of 2<sup>nd</sup> International Conference on Unsaturated Soils (Vol 2) [C]. Beijing, 1998. 1 - 36.  
[3] 包承纲. 非饱和压实土的气相形态及其与裂隙压力消散的关系[A]. 第三届全国土力学与基础工程会议论文集[C]. 北京:中国建筑工程出版社, 1979.  
[4] Bao C G, Ng C W W. Some Thoughts and Studies on the Prediction of Slope Stability in Expansive Soils (Key - note lecture) [R]. Singapore, 2000. 15 - 31.  
[5] Zhan Liangtong. Field and Laboratory Study of an Unsaturated Expansive Soil Associated with Rain-induced Slope Instability [D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology (HKUST), 2003.  
[6] 袁俊平. 非饱和膨胀土裂隙的量化模型与边坡稳定研究[D]. 南京:河海大学, 2003.  
[7] 沈珠江. 科学抽象在岩土力学研究中的意义[A]. 第九届土力学及岩土工程学术会论文集[C]. 北京:清华大学出版社, 2003. 97 - 101.  
[8] Corey A T. Measurement of water and air permeability in unsaturated soil[J]. Proc of sei soc Amer, 1957, 21(1): 7 - 10.  
[9] Yoshimi, Osterberg. Compression of partial saturated cohesive soils[J]. ASCE, 1963, (SM4).  
[10] 俞培基, 陈愈炯. 非饱和土的水—气形态及其与力学性质的关系[J]. 水利学报, 1965, (1): 16 - 23.  
[11] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect of soil suction[J]. Can Geotech J, 1996, 33: 379 - 392.  
[12] 汤连生, 王思敬. 吸湿力及非饱和土的有效应力原理探讨[J]. 岩土工程学报, 2001, 22(1): 83 - 88.  
[13] 苗天德. 低含水率非饱和土的有效应力及抗剪强度[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 393 - 396.  
[14] Bao C G, Gong B W, zhan L T. Properties of unsaturated soils and slope stability for expansive soils[A]. Proc of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils (Vol 2) [C]. Beijing, 1998. 71 - 98.  
[15] 刑义川, 谢定义, 李 振. 对“非饱和土的应力传递机理与有效应力原理”讨论的答复[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 775.  
[16] Bishop A W, et al. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils [A]. ASCE Research Conf [C]. Boulder, Colorado, USA, 1960.  
[17] 包承纲. 非饱和土的应力应变关系和强度特性[J]. 岩土工程学报, 1996, 8(1): 26 - 31.



- [18] Jennings J E B, Burland J B. Limitation to the use of effective stress in partially saturated soils [J]. *Geotechnique*, 1962, **12** (2) : 125 - 144.
- [19] Fredlund D G, Morgenstern N R. Stress state variables for unsaturated soils [J]. *ASCE J (GE)*, 1977, (3) : 447 - 466.
- [20] 陈正汉. 非饱和土的应力状态与应力状态变量 [A]. 第七届全国土力学及基础工程学术会议论文集 [C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. 186 - 191.
- [21] Willy Lecerda, Fernando A M Marinho. Engineering applications and case histories (The State of the Art Reports) [A]. *Proc of 2nd International Conference on Unsaturated Soils (Vol 2)* [C]. Beijing, 1998. 156 - 179.
- [22] 沈珠江. 广义吸力与非饱和土的统一变形理论 [J]. *岩土工程学报*, 1996, **18** (2) : 1 - 9.
- [23] Fredlund D G, Xing A. Equation for the soil-water characteristic curve [J]. *Can Geotech J*, 1994, **31** : 521 - 532.
- [24] Huang X L. Problems of buildings on slopes of expansive soils [A]. *Proc of the Inter Conf on Engineering Problems of Regional Soils* [C]. Beijing, China, 1998. 67 - 110.
- [25] 卢肇钧. 膨胀力在非饱和土强度理论中的作用 [A]. 陈善温. 卢肇钧院士科技论文选集 [C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 183 - 194.
- [26] 刘特洪. 工程中的膨胀土问题 [M]. 北京: 中国建筑工程出版社, 1997.
- [27] 高国瑞. 膨胀土微结构特性的研究 [J]. *工程勘察*, 1981, (5) : 39 - 42.
- [28] 廖济川. 膨胀土抗剪强度的研究概况 [A]. 全国首届膨胀土科学研讨会论文集 [C]. 成都: 西南交通大学出版社, 1989. 53 - 62.
- [29] 龚壁卫. 非饱和击实膨胀土总应力强度探讨 [J]. *长江科学院院报*, 1998, **15** (3) : 40 - 42.
- [30] Alonso E E. Modeling expansive soil behavior [A]. *Proc of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils (Vol 2)* [C]. Beijing, China, 1998. 37 - 70.
- [31] 徐永福. 非饱和膨胀土结构强度的研究 [J]. *河海大学学报*, 1999, **27** (2) : 39 - 42.
- [32] 李兆平, 张 弥. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究 [J]. *土木工程学报*, 2001, **34** (5) : 57 - 61.
- [33] 陈守义. 考虑入渗和蒸发影响的土坡稳定性分析方法 [J]. *岩土力学*, 1997, **18** (2) : 8 - 12.
- [34] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土的原位综合监测 [J]. *岩土力学*, 2003, **24** (2) : 151 - 158.
- [35] Ng C W W, Zhan L T, Bao C G, et al. Permeance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration [J]. *Geotechnique*, 2003, **53** (2) : 43 - 157.
- [36] Bao C G, Liu T H. Some properties of shear strength on Nanyang expansive clay [A]. *Proc of the International Conference on Engineering Problems of Regional Soils* [C]. International Academic Publishers, 1988. 543 - 546.
- [37] 蒋 刚, 林鲁生, 刘祖德, 等. 考虑非饱和土强度的边坡稳定分析方法及其应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, **20** (1A) : 1070 - 1074.
- [38] 包承纲. 南水北调中线工程膨胀土渠道边坡的稳定问题及防治对策 [J]. *人民长江*, 2003, **34** (5) : 2 - 6.
- [39] 冯光愈, 王湘凡. 南水北调中线工程总干渠膨胀土边坡稳定问题 [J]. *人民长江*, 1993, **24** (3) : 9 - 14.
- [40] 易顺民, 黎志恒, 张延中. 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义 [J]. *岩土工程学报*, 1995, **17** (5) : 294 - 298.
- [41] 姚海林, 郑少河, 葛修润, 等. 裂隙膨胀土边坡稳定性评价 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, **21** (增 2) : 2331 - 2335.
- [42] 王文生. 非饱和渗流研究及其在工程中的应用 [D]. 西安: 长安大学, 2001.
- [43] 朱 伟, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 河堤内非稳定渗流的实测与分析 [J]. *水利学报*, 2001, (3) : 92 - 96.