

渠坡非饱和膨胀土含水率与强度关系试验研究

李斌, 郝继锋, 鞠远江, 宋博, 章博, 罗小斌, 王泽智, 吕宁

An experimental study of the relationship between water content and strength of unsaturated expansive soil on canal slope

LI Bin, HAO Jifeng, JU Yuanjiang, SONG Bo, ZHANG Bo, LUO Xiaobin, WANG Zezhi, and LYU Ning

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202110049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope

陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132-140

初始孔隙比对高吸力下非饱和土土水特性的影响

Effect of initial void ratio on the soil water characteristics of unsaturated soil at high suctions

陈嘉伟, 李泽, 韩哲, 高游, 熊勇林, 丁瑞旋 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 47-54

含裂隙膨胀土无侧限抗压强度特征试验研究

An experimental study of the unconfined compressive strength characteristics of the expansive soil with cracks

李关洋, 顾凯, 王翔, 施斌 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 62-70

不同类型黏土的强度特性及其预测

Strength of different clayey soils and its prediction

陈嘉伟, 高游, 付俊杰, 李东映 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 101-106

基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162

压实黄土水分入渗规律及渗透性试验研究

An experimental study of water infiltration and hydraulic conductivity of the compacted loess

张镇飞, 倪万魁, 王熙俊, 苑康泽, 潘登丽, 刘魁 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 97-104



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202110049

李斌, 郝继锋, 鞠远江, 等. 渠坡非饱和膨胀土含水率与强度关系试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 129-136.

LI Bin, HAO Jifeng, JU Yuanjiang, *et al.* An experimental study of the relationship between water content and strength of unsaturated expansive soil on canal slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 129-136.

渠坡非饱和膨胀土含水率与强度关系试验研究

李 斌¹, 郝继锋¹, 鞠远江², 宋 博², 章 博¹, 罗小斌¹, 王泽智¹, 吕 宁¹

(1. 中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司, 河南 南阳 473200;

2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 南水北调中线渠首段渠坡土主要为膨胀土, 渠坡膨胀土含水率的变化会影响坡体稳定性。为了探究含水率变化对渠坡稳定性影响的具体特征, 对采集自南水北调中线渠首段的渠坡膨胀土进行了滴定直剪试验, 获得了渠坡膨胀土抗剪强度指标与含水率的关系曲线, 试验结果表明: 抗剪强度随含水率增加而明显衰减, 衰减过程先快后慢; 试样初始含水率越低, 黏聚力下降越慢, 内摩擦角下降越快, 不同初始含水率试样的抗剪强度均在增湿至 30% 左右时产生拐点, 此时衰减速率降低并趋于稳定。设计进行了土-水特征曲线法和瞬时剖面法导水率测试试验, 获得了非饱和渠坡膨胀土导水率随含水率变化的曲线, 试验结果表明: 含水率越低, 导水率越小, 导水率变化速率越快; 反之, 导水率变化速率越慢, 土体含水率趋于稳定。研究成果可用于膨胀土渠坡稳定性与坡体地下水位关系的定量分析, 应用在实际工程中可以更有效地获取渠坡非饱和土中含水率和抗剪强度的分布特征, 并获得含水率和抗剪强度随时间的变化规律, 为引入土体空间动态抗剪强度分析, 建立更准确的膨胀土渠坡稳定性评价模型奠定基础。

关键词: 非饱和膨胀土; 滴定直剪试验; 土水特征曲线; 导水率; 动态抗剪强度

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0129-08

An experimental study of the relationship between water content and strength of unsaturated expansive soil on canal slope

LI Bin¹, HAO Jifeng¹, JU Yuanjiang², SONG Bo², ZHANG Bo¹, LUO Xiaobin¹,

WANG Zezhi¹, LYU Ning¹

(1. Head Section, Middle Branch of China South-to-North Water Diversion, Co. Ltd., Nanyang, Henan 473200,

China; 2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou,

Jiangsu 221116, China)

Abstract: The soil layer in the canal first section of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project (MR-SNWTP) is mainly composed of expansive soil, and changes in water content of the expansive soil affect the stability of the slope. In order to make a reasonable assessment of the stability of expansive soil canal slopes, it is necessary to test and analyze the relevant physical and mechanical properties of the expansive soil on canal slopes at different water content. In this paper, titration-direct shear tests are carried out on the expansive soil collected from the canal first section of MR-SNWTP to obtain the relationship between the shear strength

收稿日期: 2021-10-28; 修订日期: 2022-02-15

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司膨胀土边坡排水及施工技术研究项目(HNHC-ZB-QSFZ-2019008)

第一作者: 李斌(1978-), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事水利工程运营维护管理和技术开发工作。E-mail: Libin@nsbd.cn

通讯作者: 鞠远江(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事滑坡、泥石流和地下水动力学方面的研究工作。E-mail: juyuanjiang@cumt.edu.cn

parameters and water content of the expansive soil. The test results show that the shear strength decreases significantly with increasing water content, and the decay process starts fast and then slows down. The lower the initial water content of the sample is, the slower the cohesion decreases, and the faster the angle of the internal friction decreases, and the shear strengths of the sample with different initial water content all show an inflection point when the water content increases to about 30%, when the decay rate decreases and becomes stable. Hydraulic conductivity tests based on soil-water characteristic curve method and instantaneous profile method are designed to obtain the hydraulic conductivity-water content curve of unsaturated expansive soil. The test results show that the lower the water content is, the smaller the hydraulic conductivity is and the faster the change rate of hydraulic conductivity is. Conversely, the slower the change rate of hydraulic conductivity is, and the more stable the soil water content tends to be. The research results of this paper can be used for quantitative analysis of the relationship between the stability of the expansive soil canal slopes and the groundwater level of the slopes. In practical applications, they can also be used to effectively obtain the distribution characteristics of water content and shear strength in the unsaturated soil of the canal slope, and to obtain the time variation laws of water content and shear strength, and a more accurate stability evaluation model is established based on spatial dynamic shear strength analysis of the expansive soil of the canal slopes.

Keywords: unsaturated expansive soil; titration-direct shear test; soil-water characteristic curve; hydraulic conductivity; dynamic shear strength

南水北调工程是世界上最大的水利枢纽工程,该工程牵涉到我国四大流域和十几个省市,涉及到大量复杂的地理环境和地质情况,其中南水北调中线工程有近 400 km 的渠道需要从膨胀岩土地区通过。南水北调中线渠首段目前面临的工程难题之一是膨胀土渠坡的处理和维护。渠坡膨胀土属于典型的非饱和土,其力学性质与含水特征关系密切,含水特征又随渗流过程而变化^[1-2]。

国内外学者针对非饱和膨胀土力学性质做了较多有意义的研究。Escario 等^[3]通过非饱和土直剪试验发现基质吸力和非饱和土抗剪强度存在非线性关系,基质吸力越大其非线性关系越显著。郭倩怡等^[4]发现基质吸力与黏聚力呈线性函数关系,在一定吸力范围内,土体的黏聚力随基质吸力呈线性增加,且基质吸力对内摩擦角影响不大。缪林昌等^[5]利用改进的非饱和土三轴仪对南阳非饱和膨胀土做了大量剪切试验,结果显示基质吸力与吸附强度存在非线性关系。多位学者运用单轴和三轴试验分别对膨胀潜势、含水率、干湿循环、冻融循环和循环次数等因素与非饱和膨胀土黏聚力、内摩擦角的关系做了很多研究:吕海波等^[6]分析了膨胀土强度衰减的拟合曲线;郭永春等^[7]设计了膨胀土连续吸水试验;崔颖等^[8]设计了增设水力梯度控制装置的 GDS 非饱和土三轴试验;舒志乐等^[9]构建了不同干湿循环次数下膨胀土的应力-应变曲线;张琦等^[10]探究了冻融循环对膨胀土

抗剪强度参数的影响。通过一系列试验发现膨胀土的土质、结构复杂多变,且常处于非饱和状态,其抗剪强度与吸力或湿度状态密切相关,这使得膨胀土抗剪强度具有动态性特点。杨庆等^[11]对非饱和膨胀土的重塑试样进行大量吸附强度试验和膨胀力试验后发现非饱和膨胀土抗剪强度随含水率不断变化,且与其吸附强度和膨胀力存在良好的线性关系。除此之外,研究发现非饱和渗流对坡体稳定性的影响也十分关键。陈善雄等^[12]分析了降雨条件下非饱和土边坡的稳定性,认为土中吸力的丧失是边坡失稳的重要因素。陈亮胜等^[13]发现非饱和渗流的时空分布对边坡稳定性影响显著,也易在饱和-非饱和和分界带形成剪应力集中区。饶鸿等^[14]发现在持续降雨过程中,雨水先在坡脚汇集再向坡体内入渗,并集中形成降雨渗透区,区域内土体软化,强度降低,塑性变形增大,逐渐发展形成圆弧形滑动面,最终导致边坡失稳。但目前对膨胀土体在非饱和-饱和之间变化时的动态抗剪强度研究尚未深入开展。

本文采用南水北调中线渠首段膨胀土试样进行了室内试验,通过土-水特征曲线试验和上渗试验讨论了渠坡非饱和膨胀土含水率的变化过程,通过滴定直剪试验讨论了含水率变化与抗剪强度变化的关系,为揭示渠坡膨胀土在非饱和-饱和之间变化时其整体和内部的渗流特征对土体抗剪强度的影响提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于河南省南阳市淅川县陶岔,属南水北调中线工程渠首段(图1)。研究区内水系发育,流量变化较大,汛期水量丰沛,枯水期水量很小。渠坡土体地下水受降水和渠道水位控制,也有较大变化。

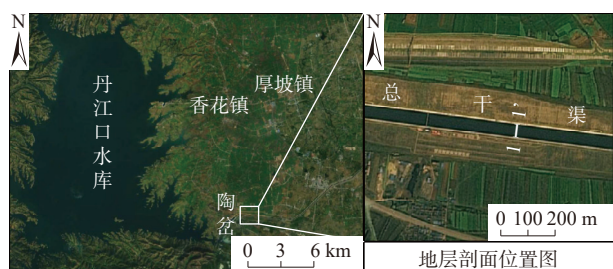


图1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

区域内地层主要由第四系残坡积(Q_4^{el+dl})粉质黏土,第四系中更新统冲洪积(Q_2^{al+pl})粉质黏土,第四系下更新统洪积(Q_1^{pl})粉质黏土、钙质结核粉质黏土,新近系(N)黏土岩、钙质团块黏土岩组成,研究区段截面1-1'渠坡剖面图如图2所示。研究区内岩土层膨胀性为中一强,且裂隙发育,岩土体强度变化较大,对渠坡稳定不利。

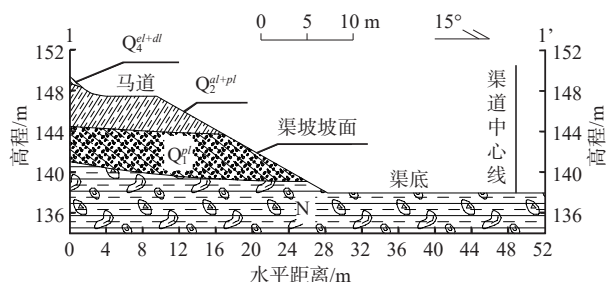


图2 研究区 1-1'截面地层剖面图

Fig. 2 Stratigraphic profile of the section 1-1' in the study area

选取第四系中更新统(Q_2^{al+pl})粉质黏土作为研究对象,探究该土层含水率与强度之间的关系。根据前期勘察^[15],该土层的物理指标与强度指标取值见表1。

表1 物理指标与强度指标值

Table 1 Values of physical and strength indicators

指标	含水率/%	干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙比	饱和度/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
取值	22.9	1.65	0.76	83	13~23	15~16

2 试验方法

2.1 导水特征试验

非饱和土含水率变化会对其工程性质产生影响^[16],

而通过试验研究非饱和膨胀土的导水能力,可以获得土体渗流特征对其含水率变化的影响^[17],从而进一步探究含水率变化对工程性质变化的影响。

非饱和土水分运移量受基质吸力(即基质势)梯度的影响,基质势又受土体含水率及其分布的影响。实践中常用土-水特征曲线法和瞬时剖面法来获取土体导水率,通过导水率可建立水分运移量模型,从而获得含水率空间分布的实时状态。本文进行了土水特征曲线试验和膨胀土上渗试验,对渠坡非饱和膨胀土导水率特征进行了探讨。

(1) 土-水特征曲线法

利用土-水特征曲线试验计算非饱和细粒土导水率是获取土体导水率的传统方法^[18]。非饱和土的导水率与作为水分运移通道的孔隙大小密切相关^[19]。导水率函数 $K(\theta)_i$ 可以表示为一系列与基质吸力有关项目之和^[20]。如果将土-水特征曲线按体积含水率(θ)分为 m 段,它的 m 个中点 i 都相应的有1个基质吸力 s_i 和1个体积含水率 θ_i ,可以认为,此时的每1个体积含水率即对应1个导水率。对于任1点 i ,其导水率 $K(\theta)_i$ 可以写为:

$$K(\theta)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} A_d \times \sum_{j=i}^m [(2j+1-2i)s_j^{-2}] \quad (1)$$

式中: i ——段的编号, $i=1,2,3,\dots,m$;

k_s 、 k_{sc} ——单独实测和由公式计算得到的饱和渗透系数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

s_j ——相应于 j 间段的基质吸力/Pa;

A_d ——调整常数,计算式为:

$$A_d = \frac{T_s^2 \rho_w g \theta_s^p}{2} N^{-2} \quad (2)$$

式中: T_s ——水的表面张力/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$);

θ_s ——饱和土的体积含水率/%;

ρ_w ——水的密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

g ——重力加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$);

N ——计数段数;

p ——孔隙尺寸影响系数,取2.0。

该试验先利用变水头法实测出膨胀土重塑样的渗透系数,然后选用TEN-30土壤张力计按增湿和干燥过程分别测定出测试段重塑膨胀土的土-水特征曲线。增湿过程试验需在试验前测得试样的含水率。试验时将插有张力计且含水率已测定的土样装入保鲜袋密封,观测张力计压力表读数并记录。张力计压力表24 h内的稳定读数即为该含水率下的基质吸

力。每隔 24 h 对保鲜膜内土样进行阶段性增湿,并记录每次加水后的阶段含水率和对应的基质吸力。如此循环,直至加水后张力计稳定读数为 0。干燥过程试验则需制备高含水率试样,以渠坡膨胀土的液限为标准。试验时不封闭土样,使其在室内自然风干,按相应的时间间隔观测和记录试样的实时含水率和基质吸力。依据土水特征曲线,按式(1)计算并绘制导水率和体积含水率的关系曲线。

(2) 上渗试验瞬时剖面法

大气影响下地下水的竖向交换是渠坡膨胀土中水分运移的主要形式,因此通过研究土中水分竖直向上的运移规律^[21],并根据试验可获取水分竖向运移时断面水通量(q)及基质吸力(s)的梯度。当规定 z 坐标向上为正时,非饱和土在垂直方向上的一维流动可由达西定律推导出导水率 $K(\theta)$ 的计算公式,即式(3)。依据该式并结合瞬时剖面法可计算非饱和导水率^[22],对渠坡膨胀土水分运移研究更有意义。其原理如图 3 所示。

$$K(\theta) = \frac{q}{\frac{\partial s}{\partial z} - 1} \quad (3)$$

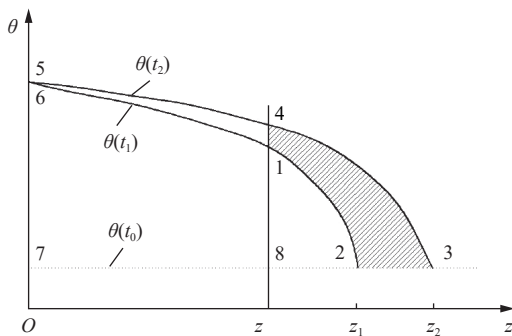


图 3 含水率分布曲线

Fig. 3 Water content distribution curve

在非饱和土水分上渗试验中,由连续性原理可知:不同位置断面体积含水率的变化值是由各断面之间水分运移量决定的,如式(4)所示,因此可以根据测得的 t_1 和 t_2 时刻不同位置断面的体积含水率分布 $\theta(t_1)$ 和 $\theta(t_2)$, 计算 t_1-t_2 时段内任一断面 z 处的水分通量 $q(z)$:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad (4)$$

对式(4)进行积分,积分限由 z_0 至 z ,则可得

$$\int_{z_0}^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = q(z_0) - q(z) \quad (5)$$

令 $z_0=0$, 则 $q(0)$ 为饱和位置水通量,记为 q_0 ,其可通过装置的总补水量扣除蒸发量后求得,式(5)可进

一步写为:

$$q_0 - q(z) = \frac{1}{\Delta t} \left[\int_0^z \theta(t_2) dz - \int_0^z \theta(t_1) dz \right] \quad (6)$$

相邻断面的初始含水差异总量可由图 3 中 1-4-5-6 的图形面积求得。 $\Delta t = t_2 - t_1$ 时段内相邻断面的含水差异总量可由图 3 中 1-2-3-4 阴影部分的面积求得,该值除以 Δt 即为 t_1-t_2 时段内 z 断面处的平均水分通量值 $q(z)$ 。取不同的 z 值,分别求出 z 断面处的平均 q 、 $\partial s / \partial z$ 和 θ (或 s) 值,便可得出 $K-\theta$ (或 $K-s$) 关系。

进行室内非饱和膨胀土水分上渗试验的装置如图 4 所示。装置主体为外径 50.0 mm、内径 45.8 mm、长 400 mm 的对分透明有机玻璃管,试验膨胀土填入玻璃管,并用支架固定在底部的供水部分之上。玻璃管侧壁标明刻度,用于确定拟选的测试断面位置。玻璃管均匀对分的目的是上渗完成后,在不扰动土样的情况下取出不同断面的土样进行含水率测试。整个玻璃管竖直向上按 5 cm 间隔利用橡胶圈和箍扣进行固定,防止玻璃管侧壁透气影响试验效果。供水装置采用渗水盆,并始终保持渗水盆水位稳定,用支架控制上渗土体与水面位置不发生变化,即保证上渗起点(渗水盆水面处)基质吸力为 0 且保持不变。

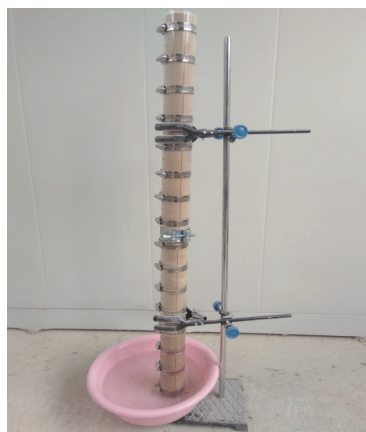


图 4 非饱和土体水分上渗试验装置图

Fig. 4 Diagram of test device for water infiltration in the unsaturated soil

试验土柱采用分层填入击实的方法获取,并控制其初始含水率和初始干密度。试验过程中为进一步防止土柱水分从侧壁蒸发,将土柱用保鲜膜缠绕密封。将土柱底部断面固定于渗水盆水面处开始试验,上渗结束后,及时打开保鲜膜、箍扣和橡胶圈,并对各断面位置土样测试含水率,按初始干密度将含水率换算为体积含水率,获得各组试验体积含水率随断面位置的变化规律。

2.2 直剪试验

膨胀土中含水率的变化对抗剪强度的影响是多方面的:一方面土的抗剪强度会随含水率的增加而降低,这是因为水分在土粒表面起润滑作用,使其摩阻力降低;另一方面,由于膨胀土的胀缩性,含水率增加后,土体膨胀并产生裂隙,导致土体整体的稳定性降低,且裂隙使土体内部更易形成贯通通道,极大地增加了膨胀土的渗透性,使土体易失稳。

地下水位以上的渠坡膨胀土为非饱和土^[23],其抗剪强度可视作饱和状态下的有效抗剪强度与基质吸力引起的吸附强度之和^[24]。但在实际应用中,基质吸力的测定较困难,且其大小随含水率变化迅速,难以用该假设获取非饱和土抗剪强度值^[25]。为此设计了滴定直剪试验,用以研究渠坡膨胀土在各级含水率下的非饱和抗剪强度指标的变化。

该试验对已知初始干密度和含水率的重塑膨胀土,先进行滴定膨胀试验,待试验土样滴定至其膨胀稳定后再进行直剪试验。试验装置主要由 DZJ-1 型电动等应变直剪仪、固结容器、护环、百分表和铝制透水板组成。

用加工的带孔透水铝板代替透水石作为加水通道。铝制透水板直径 61.5 mm、厚 15 mm,透水板轴向布置 12 个孔径 4 mm 的小孔便于快速加水滴定。试验中,通过百分表观测不同增湿含水率下土样的变形,增湿含水率以初始含水率为基础,根据每次滴定的水量,用最终实测含水率和初始含水率折算损失率后确定。滴定水用高精度注射器从透水板各孔内均匀滴入试样,每次滴定后按设计的时间间隔读取和记录百分表读数,连续 2 个读数间隔的差值小于 0.02 mm,可以认为在该级滴定含水率下土样膨胀稳定,再进行下一次滴定。直至最后 1 级增湿含水率下土样的湿胀总变形量不超过 0.02 mm 为止。

在滴定过程中,由于蒸发、附着等因素,土样每次滴定的实际吸水量一定比加水量少,因此滴定后土样的增湿含水率不能由初始含水率与滴定加水量之和来确定,应根据系统损失水量修正。在引用有效吸收比例 $\Delta m_w/m_w$ 进行修正后,土样的第 i 级实际含水率可按下式计算:

$$w_i = w_0 + \frac{m_{wi}}{m_s} \times \frac{\Delta m_w}{m_w} \times 100\% \quad (7)$$

式中: w_i ——第 i 级含水率/%;

w_0 ——初始含水率/%;

m_{wi} ——第 i 次滴定加水量/g;

m_s ——干土的质量/g;

Δm_w ——滴定后土样增加的质量/g;

m_w ——总滴定水量/g。

试验所得的抗剪强度指标值与特定初始条件下的增湿含水率——对应后,即可得到相应的关系曲线。

3 数据处理与分析

3.1 导水试验

上渗试验试样选用自由膨胀率 80%、塑限 20% 的土样配置,控制其初始含水率为 15%,初始干密度为 1.65 g/cm^3 。试验共分 7 组,分别使各组上渗时间为 1~7 d,将 7 组试验的结果统一列于图 5。

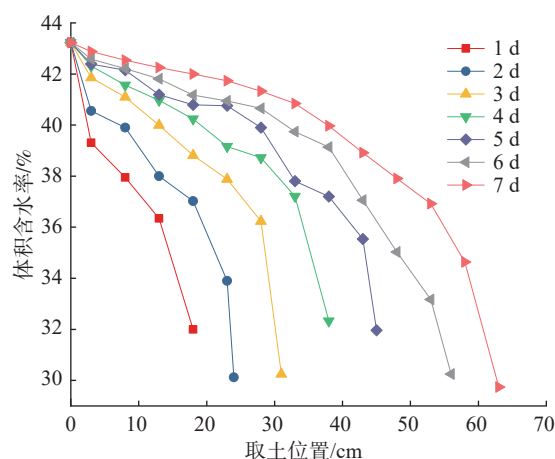


图 5 入渗 7 d 内体积含水率分布曲线

Fig. 5 Distribution curve of volumetric water content within 7 days of infiltration

分析图 5 可知,在试验开始后,土体体积含水率快速增长,相同高度位置处体积含水率增长速度随试验进行时间的增加而减小。 z_0 断面的体积含水率稳定,所有其他断面的最大体积含水率均小于 z_0 断面体积含水率。可见,非饱和渗流不可能使土体达到饱和状态。每条试验曲线最高测试点处即为湿润锋,相当于自然条件下浸润线的位置。越接近浸润面,基质吸力梯度越大,在浸润面处土体的体积含水率骤变为接近初始体积含水率,基质吸力梯度达最大值。

将各组不同试验时间获得的曲线结合式(4)~(6)计算出相邻时间段内通过各断面的水通量,单位为 mL。由于体积含水率梯度与对应的基质吸力梯度一致,则可按式(3)计算出相邻时段内各断面位置处各初始体积含水率所对应的导水率 $K(\theta)$ 。

将土-水特征曲线预测的导水率曲线与上渗试验瞬时剖面法计算得到的导水率曲线进行对比,结果如图 6 所示。

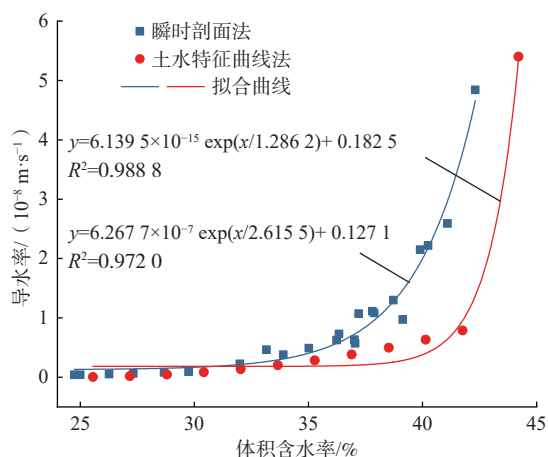


图 6 导水率曲线对比图

Fig. 6 Comparison of hydraulic conductivity curves

分析图 6 可知, 2 种方法下的非饱和膨胀土导水率 $K(\theta)$ 均随体积含水率的减小而降低, 且均呈指数分布。由于在导水率计算中, 把只在孔隙中运移的水分等价于全断面运移, 这使得实际过水面积既小于非饱和状态下的计算面积, 又小于饱和状态下的计算面积。土体体积含水率与饱和体积含水率的差值越大, 计算面积的差值也越大。因此, 在单位基质吸力梯度作用下, 体积含水率越低, 水分实际运移通道面积越小, 即使水分在土体孔隙中的真实流速不减小, 计算出的导水率也会越小。另外, 在实际土体中, 体积含水率越低, 水分越容易存在于较小的孔隙中, 导致水分运移过程中, 单位体积水分在小孔隙中所受阻力更大; 因此单位基质势条件下, 小孔隙中水分运移的实际速度要小于大孔隙中的速度。上述 2 个因素均导致导水率随体积含水率降低而降低。

含水率低于塑限时, 瞬时剖面法计算导水率曲线与土-水特征曲线预测导水率曲线基本重合, 随含水率的增大, 两者差别增大, 瞬时剖面法曲线最大值约是土水特征曲线预测曲线最大值的 5 倍。

膨胀土含水率低于塑限后, 土中结合水含量增加, 结合水膜增厚, 吸力急剧降低。而采用土-水特征曲线法预测导水率时未考虑该情况, 导致预测的导水率偏小。这从侧面说明, 膨胀土渠坡水分竖向运移规律分析中, 瞬时剖面法计算更为适用。

3.2 直剪试验

对初始干密度 1.65 g/cm^3 、不同初始含水率 ($w_0=10\%$ 、 15% 、 20%) 的土样按 5~8 级进行滴定增湿, 实测最大增湿含水率为 39.5%。各级滴定变形稳定后, 由直剪试验获得的抗剪强度指标如图 7 所示。

分析图 7 可知, 试样的黏聚力、内摩擦角均随增湿含水率的增大而减小, 可见滴定会使土样增湿膨

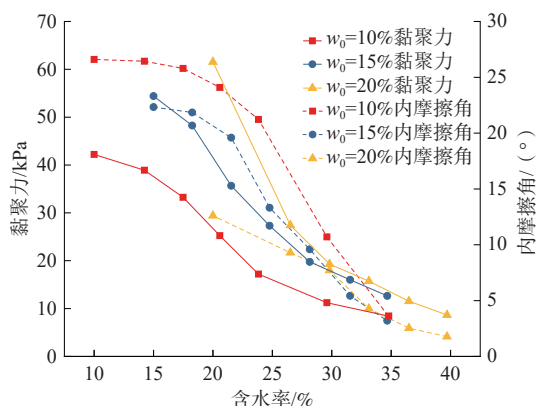


图 7 抗剪强度指标随含水率的变化

Fig. 7 Change of shear strength index with water content

胀, 土颗粒之间的联结作用降低。初始含水率越大, 黏聚力越大, 内摩擦角越小。初始含水率低时, 土样击实难度大, 内部均匀程度差; 初始含水率接近土样塑限时, 击实效果好, 内部均匀, 初始黏聚力较大; 而初始含水率高时, 水的润滑作用会使得颗粒间的摩擦力降低, 初始内摩擦角较小。不同初始含水率土的黏聚力、内摩擦角在较低增湿含水率时的差别更大, 当增湿含水率增大到 30% 以后, 由于黏聚力、内摩擦角都急剧降低, 这种情况表现得不明显。

试样黏聚力随含水率增加而降低的幅度先快后慢。增湿初期, 黏聚力急剧降低, 初始含水率为 10%、15% 和 20% 的土样, 在分别增湿到 24%、28% 和 30% 时, 黏聚力的减小速度出现拐点, 初始含水率越小, 拐点出现的越早。内摩擦角随含水率增加而减小的幅度呈先慢后快的趋势, 其拐点在 20% 含水率附近; 初始含水率 20% 的试样缓慢变化段缺失。拐点后随着含水率的不断增大, 内摩擦角近似呈线性减小。

4 讨论

综合上述试验结果可知, 膨胀土渠坡的水位开始变化时, 由于基质吸力和重力的共同作用, 水位线以上的非饱和膨胀土的含水率开始变化, 其导水率也随之变化。含水率越低, 导水率越小, 但导水率变化速率越快, 土体含水率分布变化也越快; 反之, 含水率越高, 导水率越大, 但导水率变化速率越慢, 土体含水率趋于稳定。通过滴定直剪试验可知, 随着含水率的增加, 渠坡非饱和膨胀土的抗剪强度会随之降低。初始含水率越低, 黏聚力下降越慢, 内摩擦角下降越快。

初始含水率越低, 土体导水率对含水率的变化率影响越强。由于含水率变化率与抗剪强度降低速率成正相关, 因此低含水率渠坡非饱和膨胀土的抗剪强度受水位波动影响更加明显。降水入渗或渠坡水位

上升,会导致地表与地下水位之间的土体含水率增加,强度降低明显;反之,干燥少雨或渠坡水位下降,会导致地表与地下水位之间的土体含水率减小,强度增加。即非饱和膨胀土体的抗剪强度指标不等价于其天然含水率强度指标,也比饱和强度指标要高,并随空间位置和水位条件变化而变化,使用勘察获取的强度指标进行稳定性分析是不严谨的。

在实际工程中,渠道水位升降、地表降水引起地下水位上升、人工排水引起地下水位下降等,都会使渠坡膨胀土含水率分布发生明显变化,土体抗剪强度分布同时发生明显变化,实际的最危险滑面位置也会发生变化,因此在计算渠坡稳定性时,不宜直接使用天然含水率强度或土体饱和强度,而应考虑水位变化引起的渠坡不同位置含水率的变化,也就是应在稳定性分析模型的基础上再建立 1 个含水率变化模型,这个模型的饱和带以潜水位的变化为代表,非饱和带以对应位置的导水率作为含水率的变化比率。本文设计的试验及其结果曲线可为含水率变化模型及渠坡稳定性分析模型的建立提供计算参数和理论依据。

5 结论

(1)南水北调中线渠首段渠坡非饱和膨胀土的初始含水率会影响导水率,含水率变化速率受导水率影响较大,含水率的变化会引起抗剪强度相应变化。

(2)含水率越低,导水率越小,导水率变化速率越快,反之导水率变化速率越慢,土体含水率趋于稳定。

(3)抗剪强度随含水率增加而明显衰减;初始含水率越低,黏聚力下降越慢,内摩擦角下降越快。强度衰减过程先快后慢;不同初始含水率试样的抗剪强度均在增湿至 30% 左右时产生拐点,衰减速率降低并趋于稳定。

参考文献 (References) :

- [1] 贾文聪,李永红,党进谦,等.膨胀土强度特性的试验研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(5):217—221. [JIA Wencong, LI Yonghong, DANG Jinqian, et al. Strength characteristics of expansive soil[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2015, 43(5): 217—221. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 杨和平,曲永新,郑健龙.宁明膨胀土研究的新进展[J].岩土工程学报,2005,27(9):981—987. [YANG Heping, QU Yongxin, ZHENG Jianlong. New development in studies on Ningming expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 981—987. (in Chinese with English abstract)]
- [3] ESCARIO V, SAEZ J. The shear strength of partly saturated soils[J]. *Geotechnique*, 1986, 36(3): 453—456.
- [4] 郭倩怡,谷天峰,吴熠哲.永靖非饱和黄土抗剪强度试验研究[J].水文地质工程地质,2015,42(6):103—107. [GUO Qianyi, GU Tianfeng, WU Yizhe. A test study of shear strength of unsaturated loess in Yongjing County[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(6): 103—107. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 缪林昌,殷宗泽.非饱和土的剪切强度[J].岩土力学,1999,20(3):1—6. [MIAO Linchang, YIN Zongze. Shear strength of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(3): 1—6. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 吕海波,曾召田,赵艳林,等.胀缩性土强度衰减曲线的函数拟合[J].岩土工程学报,2013(增刊2):157—162. [LYU Haibo, ZENG Zhaotian, ZHAO Yanlin, et al. Function fitting on strength attenuation curve of swell-shrinking soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013(Sup2): 157—162. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 郭永春,陈伟乐,赵海涛.膨胀土吸水过程的试验研究[J].水文地质工程地质,2016,43(4):108—112. [GUO Yongchun, CHEN Weile, ZHAO Haitao. Experimental research of water-uptake process of the expansive soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(4): 108—112. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 崔颖,缪林昌.非饱和压实膨胀土渗透特性的试验研究[J].岩土力学,2011,32(7):2007—2012. [CUI Ying, MIAO Linchang. Testing study of permeability characteristics of unsaturated compacted expansive soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(7): 2007—2012. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 舒志乐,孙启明,廖智伟,等.干湿循环下膨胀土应力-应变行为及强度分析[J].中国科技论文,2021,16(8):825—829. [SHU Zhile, SUN Qiming, LIAO Zhiwei, et al. Stress-strain behavior and strength study of expansive soil under dry-wet cycles[J]. *China Sciencepaper*, 2021, 16(8): 825—829. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张琦,杨忠年,时伟,等.冻融循环下初始含水率对非饱和膨胀土剪切特性试验[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(5):1544—1550. [ZHANG Qi, YANG Zhongnian, SHI Wei, et al. Experiment on shear characteristics of unsaturated expansive soil with initial moisture content under freezing-thawing cycles[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021, 51(5): 1544—1550. (in Chinese with English abstract)]

- [11] 杨庆, 张慧珍, 栾茂田. 非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004(3): 420 – 425. [YANG Qing, ZHANG Huizhen, LUAN Maotian. Testing study on shear strength of unsaturated expansive soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004(3): 420 – 425. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 陈善雄, 陈守义. 考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J]. *岩土力学*, 2001, 22(4): 447 – 450. [CHEN Shanxiong, CHEN Shouyi. Analysis of stability of unsaturated soil slope due to permeation of rainwater[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(4): 447 – 450. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 等. 膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 132 – 140. [CHEN Liangsheng, WEI Bingxu, LIAO Huan, et al. A coupling analysis of unsaturated seepage and pro-gressive failure of an expansive soil slope[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 132 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 饶鸿, 王金淑, 赵志明, 等. 基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 154 – 162. [RAO Hong, WANG Jinshu, ZHAO Zhiming, et al. An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 154 – 162. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 陈善雄, 冷星火, 赵旻, 等. 强膨胀土渠坡破坏机理及处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 24 – 29. [CHEN Shanxiong, LENG Xinghuo, ZHAO Min, et al. Damage mechanism and treatment technology for strongly expansive soil drainage slope[M]. Beijing: Science Press, 2016: 24 – 29. (in Chinese)]
- [16] 夏蒙. 膨胀土非饱和特性试验研究及其在边坡稳定性分析中的应用[D]. 西安: 西北大学, 2013. [XIA Meng. Unsaturated expansive soils characteristics experimental study and its application in slope stability analysis[D]. Xi'an: Northwest University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 肖夺. 宁明膨胀土渗透特性的试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006. [XIAO Duo. Testing research on permeability of Ningming expansive soils[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李萍, 李同录, 王红, 等. 非饱和黄土土-水特征曲线与渗透系数Childs & Collis-Gerge 模型预测[J]. *岩土力学*, 2013, 34(2): 184 – 189. [LI Ping, LI Tonglu, WANG Hong, et al. Soil-water characteristic curve and permeability prediction on Childs & Collis-Gerge model of unsaturated loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(2): 184 – 189. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李雄威, 张鹤年, 张勇. 膨胀土渗透性室内试验与非饱和渗透系数预测[J]. *四川建筑科学研究*, 2011, 37(5): 115 – 118. [LI Xiongwei, ZHANG Henian, ZHANG Yong. Lab test and unsaturated coefficient prediction of expansive soil permeability[J]. *Sichuan Building Science*, 2011, 37(5): 115 – 118. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 戴张俊, 陈善雄, 罗红明, 等. 非饱和膨胀土/岩持水与渗透特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(1): 134 – 141. [DAI Zhangjun, CHEN Shanxiong, LUO Hongming, et al. Experimental study of water-holding and permeability characteristics of unsaturated expansive soils and rocks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 134 – 141. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 杨毅凡. 一种非饱和膨胀土渗透性试验技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [YANG Yifan. Study on a kind of permeability test technology of unsaturated expansive soil[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 贺雷, 王志俭, 曹玲, 等. 不同干密度下的非饱和膨胀土渗透特性试验研究[J]. *中国水运*, 2015, 15(5): 300 – 304. [HE Lei, WANG Zhijian, CAO Ling, et al. Experimental study on permeability characteristics of unsaturated expansive soils under different dry densities[J]. *China Water Transport*, 2015, 15(5): 300 – 304. (in Chinese)]
- [23] 谢定义. 非饱和土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 152 – 160. [XIE Dingyi. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015: 152 – 160. (in Chinese)]
- [24] 肖正. 膨胀土基坑水位变化对抗壁荷载影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019. [XIAO Zheng. Study on the influence of water level change of expansive soil foundation pit on pit wall load[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 严神通. 平顶山市西湖明珠膨胀土深基坑坑底浸水条件下土钉支护研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019. [YAN Shentong. Study on soil nailing support for deep foundation pit in pearl expansive soil of Xihumingzhu in Pingdingshan City[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华

实习编辑: 刘真真