中国地质灾害与防治学报
THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL
中国科技核心期刊
《中国科学引用文数据库》来源期刊
Caj-cd规范获奖期刊

膨胀土裂隙对渠坡渗透性及工程效应影响研究

李　斌，鞠远江，宋　博，张凯迪，郝继锋，张智敏

Study on the effect of fissures in expansive soils on permeability and engineering effects of canal slopes

LI Bin, JU Yuanjiang, SONG Bo, ZHANG Kaidi, HAO Jifeng, and ZHANG Zhimin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202301017

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于支持向量机的膨胀土胀缩等级预测

Predicting of swelling-shrinking level of expansive soil using support vector regression

周苏华, 周帅康, 张运强, 聂志红, 雷瑜　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 117-126

泥岩地基中黏土矿物含量对高速铁路无砟轨道膨胀潜势的影响

Expansive potential of ballastless track on high speed railway mudstone foundation with low clay mineral content

丁小刚, 马丽娜, 张戎令, 李佳敏, 张唐瑜, 王斌文　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 108-116

初始含水率与竖向应力对弱膨胀土残余强度的影响

${suggestArticle.titleEn}

蒋晓庆, 丁三宝, 黄益顺, 李永彪　中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(6): 142-149

季节性冻土区滑坡防治工程的冻融效应分析

Analysis on the effect of freeze-thaw on landslide prevention projects in seasonal frozen soil area

杨栋, 王全成, 姜昭群　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 82-89

基于离散元的含软弱夹层岩质边坡滑移机理分析

${suggestArticle.titleEn}

范昊天, 孙少锐, 王亚山, 张纪星, 刘宝生　中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(3): 12-17

压实作用对泥岩膨胀性及水分迁移影响

${suggestArticle.titleEn}

张唐瑜, 马丽娜, 张戎令, 王起才, 王天双　中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(4): 98-103

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202301017
李斌, 鞠远江, 宋博, 等. 膨胀土裂隙对渠坡渗透性及工程效应影响研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(6): 137-144.
LI Bin, JU Yuanjiang, SONG Bo, et al. Study on the effect of fissures in expansive soils on permeability and engineering effects of canal slopes[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(6): 137-144.

膨胀土裂隙对渠坡渗透性及工程效应影响研究

李　斌[1], 鞠远江[2], 宋　博[2], 张凯迪[2], 郝继锋[1], 张智敏[3]
（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；3. 长江设计集团有限公司, 湖北 武汉　430010）

摘要: 膨胀土是一种特殊的非饱和土, 也是南水北调中线渠首段土体的主要成分。与一般黏性土相比, 膨胀土具有裂隙性, 裂隙的存在会对其渗透性产生影响, 进而影响到膨胀土渠坡的实际排水效果。为了探究膨胀土渗透性与其裂隙和含水量之间的关系, 采用自制的渗流装置对相关地区的非饱和膨胀土进行渗流试验。试验结果表明, 不同初始条件的土样在饱和环境中渗流时其渗透系数都会随着渗流的进行而逐渐减小。在同等初始含水率情况下, 土样的裂隙率越大, 渗透系数越大, 渗透系数到达稳定状态所需的时间就越长; 在相同初始裂隙率情况下, 初始含水率低的土样, 渗透性小但基质吸力大, 吸水后会迅速膨胀导致渗透性越来越差。通过分析土体从不同初始条件开始渗流至饱和状态期间土体渗透系数的变化过程, 可以发现在渗流开始的 2 h 以内, 渠坡排水设施的排水效果最好, 在 8 h 内渠坡排水设施都具有一定效果, 超过 8 h 后排水效果有限。

关键词: 地质工程; 膨胀土; 渗流试验; 裂隙率; 排水效果
中图分类号: TU443　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1003-8035(2024)06-0137-08

Study on the effect of fissures in expansive soils on permeability and engineering effects of canal slopes

LI Bin[1], JU Yuanjiang[2], SONG Bo[2], ZHANG Kaidi[2], HAO Jifeng[1], ZHANG Zhimin[3]
(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*;
3. *CISPDR Corporation*, *Wuhan*, *Hubei*　430010, *China*)

Abstract: Expansive soils represent a special type of unsaturated soil and constitute a major component of the soil structure in the initial canal section of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project(MR-SNWTP). Compared to typical cohesive soils, expansive soils exhibit fissures that can impact their permeability, subsequently influencing the drainage efficiency of expansive soil slopes. To investigate the relationship between permeability of expansive soils, fissures, and moisture content, percolation tests were carried out on unsaturated expansive soils in the relevant region using a self-made permeability apparatus. The experimental results indicate that the permeability coefficient of soil samples with different initial conditions decreases gradually during percolation in a saturated environment. At the same initial water content, the greater the

收稿日期: 2023-01-19; **修订日期:** 2023-03-27　　**投稿网址:** https://www.zgdzzhyfzxb.com/
基金项目: 南水北调中线渠首分局技术研究项目(HNHC-ZB-QSFZ-2019008)
第一作者: 李　斌(1978—), 男, 农业建筑环境与能源工程专业, 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研究。E-mail: Libin@nsbd.cn
通讯作者: 鞠远江(1975—), 男, 地质工程专业, 博士, 副教授, 主要从事滑坡泥石流研究和地下水动力学研究。E-mail: juyuanjiang@cumt.edu.cn

fracture ratios of the soil sample, the greater the permeability coefficient and the longer it takes for the permeability coefficient to reach a steady state. Under equal initial moisture content, greater fissure rates of soil samples result in higher permeability coefficients, and the time required for the permeability coefficient to stabilize increases. Under the same initial fissure rate, soil samples with lower initial moisture content exhibit lower permeability but higher matric suction; however, rapid expansion due to water absorption leads deteriorating permeability. By analyzing the changes in soil permeability coefficients during the transition from different initial conditions to a saturated state, it is observed that the drainage effectiveness of canal slope drainage facilities is most significant within 2 hours of the start of the seepage, remains noticeable within 8 hours, and becomes limited after 8 hours.

Keywords: geological engineering; expansive soil; seepage test; fissure ratios; drainage effectiveness

0 引言

南水北调中线工程渠首段位于河南省南阳市，渠段内土体多为膨胀土。膨胀土是在自然地质过程中形成的一种具有显著胀缩性且裂隙发育的特殊土体，对于环境变化、特别是湿热变化非常敏感，且膨胀土的存在会改变周围土体的工程地质特征。因此渠首段渠坡的渗透特性与一般的黏性土边坡不同，这会导致排水措施的效果与期望排水效果有差异[1]。且相比于一般土体的渗透特性，膨胀土的裂隙发育程度会影响到其渗透性变化过程[2]。因此，探究膨胀土裂隙发育特征与其渗透性之间的关系，从而确定渠坡段排水措施的实际排水效果是十分必要的。

国内外学者们对于土体渗流特性的研究已经十分深入。在最初进行的渗流场研究中，学者们的研究方向主要集中在饱和渗流场，如 Henry Darcy 发现的层流状态下饱和土体的渗透定律—达西定律。但对于非饱和区域的土体，达西定律的应用存在局限性。后续学者在达西研究的基础上进行了深度的研究，取得了一些成果。对于那些超出达西定律的流动，Forchheimer 提出了非达西渗流运动方程，蒙学礼等[3]在此基础上计算出了非线性系数及渗透率，雷怡等[4]将剖面二维潜水运动方程作为控制方程，结合排水前坡体渗流场作为初始条件，理论推导并创新地得到了潜水面边界条件。Richard[5]提出了 Richard 渗流控制方程，其将达西的线性渗流理论应用到非饱和渗流理论研究中，师文豪等[6]基于等效连续介质模型和 Louis 经验公式建立的各向异性岩体渗流应力耦合模型，对顺倾向层状边坡的各向异性渗流规律进行了模拟和总结。Jacob[7]基于质量守恒定律提出了渗流连续性方程，并在工程渗流计算中得到广泛应用。饱和情况下的渗流微分方程的解析解可直接得到；而对非饱和渗流，其渗流微分方程是非线性的，直接求解非常困难。随着计算机技术的发展，学者们开始应用有限元方法来进行渗流场的求解。Zienkiewicz[8]等最早将有限元法引用到流体力学领域，Finn[9]等将有限单元法运用到稳定渗流领域。Neuman[10]等将有限元发展到非稳定渗流计算中。Fredlund[11]在达西定律的基础上推导了饱和-非饱和渗流微分控制方程，并将其应用到几个瞬态渗流问题的数值分析中。

对于非饱和膨胀土来讲，基质吸力是影响其渗透性的重要因素，Thakur 等[12]与 Al-Mahbashi 等[13]都对土的基质吸力进行了相关研究，证明了基质吸力和含水率的关系，深入研究非饱和膨胀土渗透特征，并发现了膨胀土吸力测定技术固有的滞后现象，且这种滞后性与土的特性无关。这将部分学者的研究视野带向了土—水特征曲线，Sillers[14]和 Sillers 等[15]研究了用于表示土—水特征曲线的相关数学模型，并采用非线性最小二乘法确定了一些经验方程较好的拟合参数；李萍等[16]测量出土—水特征曲线并计算了渗透系数与含水率的关系，张琦等[17]探究冻融循环条件下初始含水率对膨胀土偏应力应变关系和剪切特性的影响，发现初始含水率是影响非饱和膨胀土力学性质的主要原因。这些研究成果都为非饱和渗透提供了理论依据，为非饱和渗透的预测打下基础，如李志清等[18]通过 6 种测量 SWCC 的方法预测了渗透系数的数学模型；马洪波等[19]基于预测渗透系数的数学模型计算出了非饱和填料的渗透系数。这些预测非饱和渗透的数学模型对裂隙发育的膨胀土边坡渗透性提供了重要的参考，袁俊平等[20]建立了考虑裂隙的非饱和膨胀土边坡入渗的数学模型，利用有限元方法对裂隙特征与渗透特征进行了分析；陈铁林[21]基于非饱和土广义固结理论，对膨胀土边坡进行了有限元计算分析，与膨胀土边坡无裂隙的情况进行了对比，吕建航等[22]通过实验发现土工格栅可约束膨胀土冻融裂缝，使裂缝发育更为均匀一致，同时减小边坡位移。王玮等[23]在此基础上提出了估算裂隙与渗透系数关系的

PNC 模型，为探究膨胀土裂隙性与渗透性的关系建立了理论基础。

上述的学者都对膨胀土的非饱和渗透性，以及膨胀土裂隙对于其渗透性的影响方面有了一定的探索，本文在此基础上，设计了裂隙型膨胀土渗透过程室内试验模型，针对膨胀土渗透性随渗透时长的变化进行研究。通过模拟裂隙型膨胀土的渗流过程，进行了膨胀土从不同初始状态到达到渗流稳定状态的渗流试验，探究裂隙型膨胀土的渗透系数变化与初始含水率、初始裂隙率的关系。分析由于初始含水率、初始裂隙率的变化所导致的土体渗透性发生波动的原因，并依据上述结果分析渠坡排水效果。

1　裂隙型膨胀土渗透过程模型

1.1　试样基本参数

试样取自河南南阳市淅川县南水北调工程渠坡附近，在获取土样后依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)对样品进行室内土工试验，获取试样参数。

将样品进行编号后，对 1—5 号土样进行了含水率测试、重度测试以及抗剪强度测试。获取的基本参数指标见表 1。

表 1　试样基本参数指标

Table 1　Fundamental parameters of test samples

编号	含水率/%	重度/(kN·m^{-3})	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	12.4	19.1	14.0	11.0
2	10.1	22.1	20.0	14.0
3	25.4	19.7	24.0	16.0
4	29.1	19.9	61.3	22.8
5	28.2	20.3	72.5	25.0

1.2　模型建立及试验原理

由于土体经历自然蒸发所产生的裂隙具有随机性，是研究裂隙率和膨胀土体渗透性的不可控因素。因此，建立一个能够定量控制土体裂隙率的试验模型尤为重要。当相应的模型建立之后，通过控制其初始条件，对土体进行渗流试验，获取关于渗透系数的变化曲线，即可研究膨胀土裂隙率与渗透系数的关系。

渗透试验采用常水头方法来计算裂隙型膨胀土的渗透系数，渗透系数 (k) 的计算公式：

$$k=\frac{Q}{\rho_{\mathrm{w}}tA_i}=\frac{QL}{\rho_{\mathrm{w}}tA(h_1-h_2)} \tag{1}$$

式中：Q——t时间段内渗透经过试样的水质量/g；

ρ_{w}——水的密度/(g·cm^{-3})；

L——试样的有效长度/cm；

A——试件的横切面面积/cm^2；

(h_1-h_2)——水头差/cm。

试验开始时，从进水口注水至模型两侧形成所需要的水头差，并在出水口处设置量筒，等到有水渗出时记录时间和渗出水量，通过计算得到膨胀土的渗透系数。

1.3　试验方法

图 1 为测试裂隙型膨胀土渗透系数的试验装置，由马利奥特瓶、渗透装置和过滤装置组成。渗透装置共分三个实验仓，两端为砾石组成的过滤仓，中间为渗透仓。

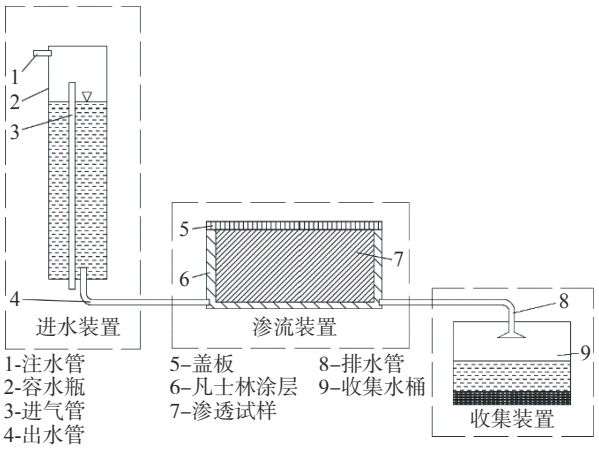


图 1　装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the self-made permeability apparatus

将土样风干并用粉碎机粉碎，过 2 mm 筛，其风干含水率为 5%。将土样置于容器中加入适量的水，进行充分搅拌，由于膨胀土吸水能力强，此处搅拌要使土中迅速吸水形成的团块散开。

控制土样初始含水率为 25%。为使土样中的水分分布均匀，将土样装入塑料袋密封 72 h。然后称取适量的土样制成土条，按要求置于模型之中。

在土样自然干燥过程中分别设定了 5 个含水率控制标准：25%、20%、15%、10%、5%。将部分压制好的试样密封保存并制成土条，其初始含水率为 25%，将其他剩余试样置于蒸发皿中，在自然条件下进行干燥(温度：20℃ 左右)，每隔 6 h 对样品称重，根据重量变化计算膨胀土样品的含水率。当试样含水率达到上述控制标准时，选取试样并密封保存 96 h，让水分进一步分布均匀。在测试过程中，确保每个控制标准至少使用 5 个平行样进行试验。

根据现场的裂隙条数、宽度、长度数据概化[24]，设置不同初始裂隙率从 4%、6.5%、9%、11.5%、14%，共

计 5 个等级。

将上述制成的土条置于渗透仓，利用膨胀土条间的空隙模拟裂隙型膨胀土，仓内壁涂满凡士林，对土体图像进行二值化处理，处理前后的图像见图 2。利用 PCAS 软件[25]计算土体裂隙率见图 3，根据工况的不同调整土体裂隙率等参数。顶部用薄泡沫板和玻璃胶密封，防止渗漏。

图 2 二值化处理前后的土条图像

Fig. 2 Soil strips images before and after binarization processing

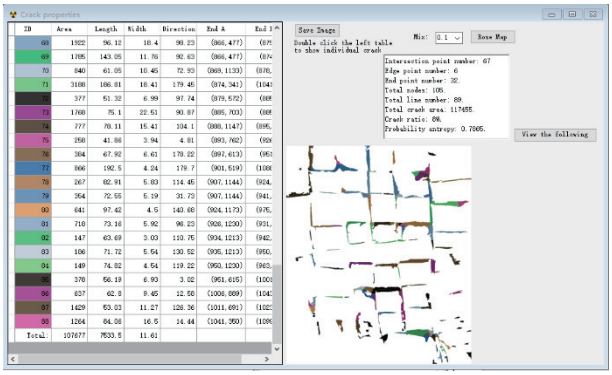


图 3 PCAS 系统计算裂隙率界面图

Fig. 3 PCAS system interface for calculating fracture ratio

在准备工作结束后，向马里奥特瓶内注水，等到收集水桶内水开始溢出时，记录单位时间内溢出水的量。由于试验刚开始时渗透状况改变速度较大，记录时间的间隔要密一些为 10 min，待到计算溢出水量变化幅度变小时，增大记录时间间隔至 30 min，直至渗流稳定。

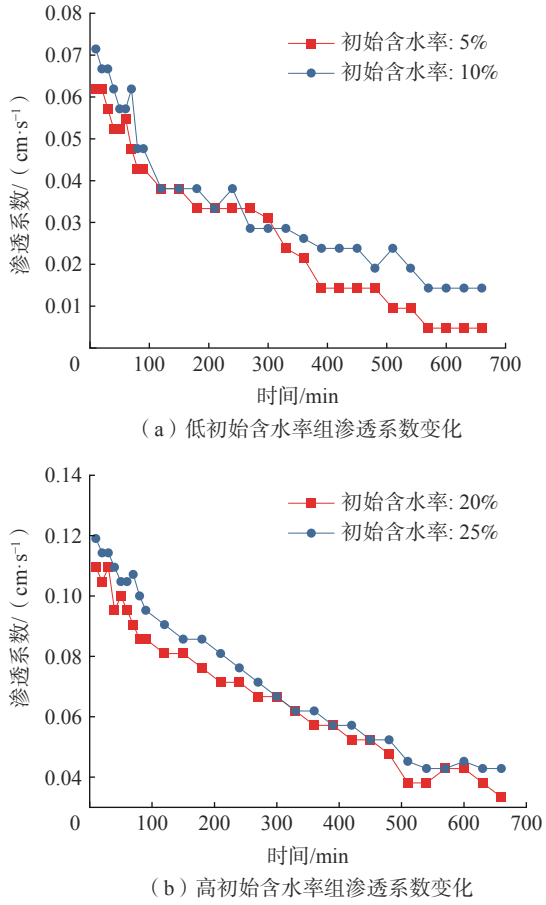
2 初始条件对膨胀土渗透过程的影响

依据裂隙条数、宽度、长度等数据对试验进行结果概化，将 25%、20% 定义为高初始含水率；15% 定义为中初始含水率；10%、5% 定义为低初始含水率。将 14%、11.5% 定义为高初始裂隙率；9% 定义为中初始裂隙率；6.5%、4% 定义为低初始裂隙率。每组试验做 5 次，试验时间为 660 min，取 5 次试验渗透系数平均值，以减小偶然误差对于渗透系数变化曲线的影响。

2.1 初始含水率对渗透系数的影响

初始含水率对膨胀土的渗流情况影响甚大，为进一步探究不同初始含水率对膨胀土渗流的影响情况，需设置不同组别试验。

在 9% 初始裂隙率情况下，将初始含水率分为 25%、20%、15%、10%、5% 5 组，来研究初始含水率对膨胀土的渗流的影响，9% 裂隙率下不同初始含水率下渗透系数变化曲线如图 4 所示。



（a）低初始含水率组渗透系数变化

（b）高初始含水率组渗透系数变化

图 4 不同初始含水率时渗透系数变化图

Fig. 4 Variation of permeability coefficient under different initial water content

对比 4 组不同含水率的渗透系数变化曲线，可以发现在初始裂隙率一定的情况下，土体的起始渗透系数随着初始含水率的增加而增加。这是由于初始含水率高的土体，其膨胀潜势较小，在渗流时土体的胀缩量也较小。

在裂隙率相同时，初始含水率越高，渗透系数变化幅度越小。这是由于在高初始含水率情况下，土体内部在与水接触后膨胀的程度比低初始含水率情况下要小得多，土条与土条之间裂隙闭合不充分。渗透水流在高初始含水率的土体中，仍然可以沿着尚闭合不充分的膨胀土裂隙发生渗流作用导致比低初始含水率土体的渗透系数偏大。

随着渗透时间的增长，试样的渗透系数逐渐降低并稳定在某一值，且初始含水率高的试样稳定值越高，反之则越低。这是由于土体在饱和环境的渗流作用下，已经达到能膨胀的最大值。随着初始含水率的降低，渗透系数的稳定值也在减小。这是因为初始含水率高的试样，土体内部空隙较大，在渗流过程中纵使膨胀土在不断吸水膨胀但还是无法使较大裂隙闭合，最终稳定在某一值处。从变化幅度来看，试样的初始含水率越低，变化幅度越大。当初始含水率逐渐升高时，其渗透性变化程度也在变小。由于土体在低初始含水率情况下，土体中基质吸力较大，吸收水的潜力较大。在渗流过程中不断吸水导致土体膨胀，逐渐将土条间的裂隙填满降低土体整体的渗透性。

2.2　初始裂隙率对渗透系数的影响

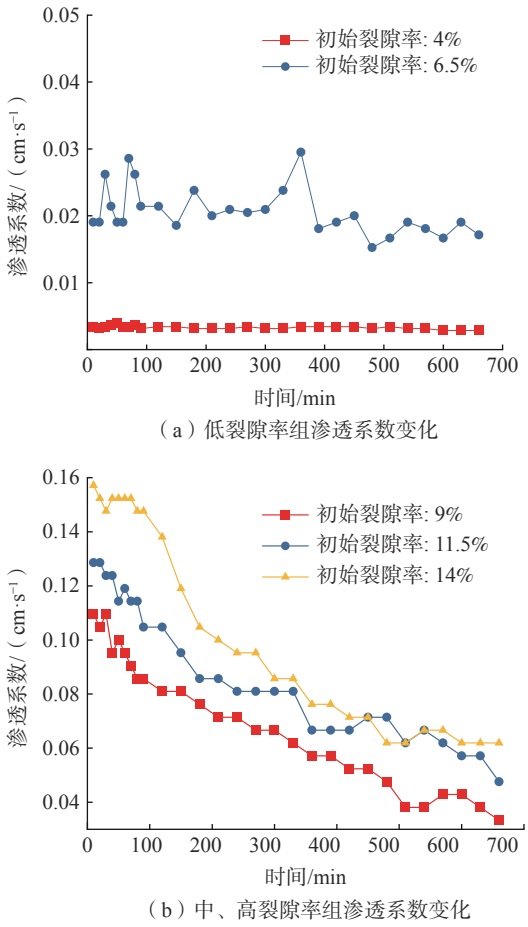
膨胀土初始裂隙率对土体的渗流情况影响较大，为进一步探究不同初始裂隙率对膨胀土渗流的影响情况，设置不同组别试验，在 20% 初始含水率和 5% 初始含水率情况下，将初始裂隙率分为 14%、11.5%、9%、6.5%、4% 5 组。

20% 初始含水率的土体在不同初始裂隙率下的渗透系数变化曲线如图 5 所示。

图 5(a)中初始裂隙率为 6.5% 的试样，5 次试验得出平均渗透系数值存在波动，始终维持在 2×10^{-4}m/s；初始裂隙率为 4% 的试样，渗透系数一直保持 3×10^{-5}m/s。而在 20% 含水率情况下，裂隙型膨胀土的渗透性在低裂隙率范围内变化并不明显。由于土条间的裂隙过于狭窄，膨胀土体在高初始含水率时，发生的膨胀足以将裂缝填满，导致土体渗透系数并不发生显著变化。

而从图 5(b)中可以观察到，土体的渗透系数随渗透时间的增长而变小，且随着初始裂隙率的增大，渗透系数也在增大。渗透系数变化幅度随初始裂隙率的增大而减小。中、高初始裂隙率组的土样和低初始裂隙率组的渗透系数变化有显著不同，直接影响因素为初始裂隙率。当裂隙率逐渐降低到一定值时，土体在经历渗透作用吸水后将裂隙填满，水流失去渗流通道导致土体的渗透变化不明显。在中、高初始裂隙率组中，上述过程同样存在，从图 5 中可见裂隙逐渐闭合，渗透系数逐渐变小。

对比不同初始裂隙率的试验可以得出土体的渗透系数随着初始裂隙率的减小而降低。初始裂隙率成为影响渗透系数的重要因素，当初始裂隙率越小，裂隙完全闭合需要的时间越短，渗透进土体内的水就越少，渗透系数也就相应的越小。



（a）低裂隙率组渗透系数变化

（b）中、高裂隙率组渗透系数变化

图 5　不同初始裂隙率时渗透系数变化图

Fig. 5　Variation of permeability coefficient under different initial fracture ratios

3　渗透性变化对排水效果的影响

上述试验证明了初始含水率和初始裂隙率是引起膨胀土渗透系数变化的重要影响因素。因此可以从单因素影响和实际工况 2 个方面来探究膨胀土的渗透性变化过程，并进一步分析不同情况下渠坡内排水措施的排水效果。

3.1　单因素影响下渗透性变化

(1)在初始裂隙率一定时，研究不同初始含水率和渗透系数之间的关系。图 6 为初始裂隙率为 9% 时，不同初始含水率膨胀土渗透系数的变化过程，根据渗流过程中渗透系数的变化速率可将整个过程分为前中后期，其中前期指试验开始后 2 h 内，中期指 2 ~ 8 h，后期指 8 h 后到试验结束。

由图 6 可知，渗透系数随着初始含水率的增加而增大。在渗透前期，渗透系数下降较快，在 2 h 左右达到最大降低速率。在实际膨胀土渠坡排水过程中这 2 h 极为关键，可以将水迅速从坡体内排除。在渗透中

期的 6 h 内，土体渗透性相对较强，渗透系数降低也较明显，实际工程中应使土体中的水尽量在该阶段排出坡体，维持稳定性。

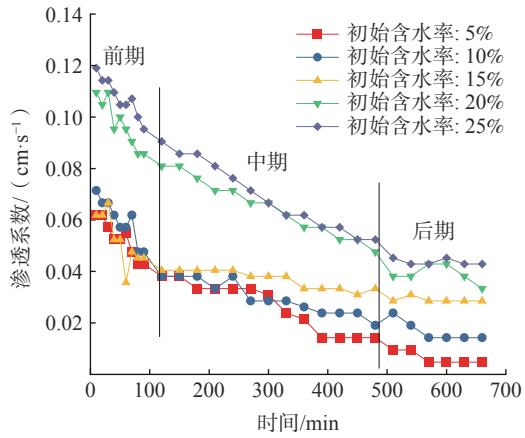


图 6 9% 裂隙率时渗透系数变化图

Fig. 6 Variation of permeability coefficient at 9% initial fracture ratio

在渗流后期阶段，渗透系数变化的幅度在逐渐减小。在水的渗透作用下，膨胀土体逐渐膨胀将裂隙挤占，导致渗水通道受阻，渗透系数变小。而含水率越高，其膨胀潜力越小，土体内仍有裂隙尚未闭合，使得水有空间渗流。随着渗流作用的进行，膨胀土体逐渐吸满水分，膨胀作用减弱，导致渗透系数逐渐趋于稳定。一旦进入后续阶段，渗透性降至最低，且基本无变化，会导致排水困难。

(2)在初始含水率一定时，研究初始裂隙率和渗透系数之间的关系。以 20% 初始含水率为例，不同初始裂隙率的试样渗透系数变化曲线见图 7。

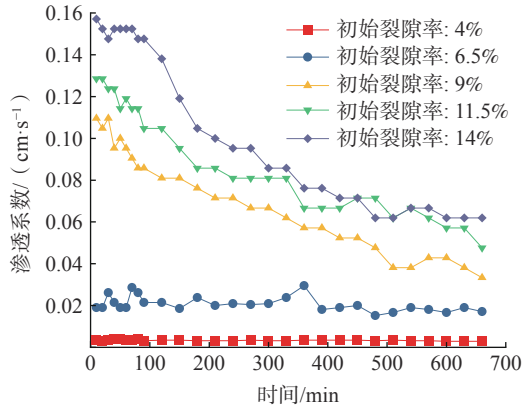


图 7 20% 初始含水率时渗透系数变化图

Fig. 7 Variation of permeability coefficient at 20% initial water content

从图 7 中可以看出，与初始含水率因素影响下最大的不同是低裂隙组和中、高裂隙率的差异。在 20% 初始含水率条件下，低裂隙组的渗透系数变化幅度极少，但中、高裂隙组的渗透系数变化可以观察到。这主要由于，低裂隙组的土体内部裂隙比较少，在渗流作用发生后，土体膨胀裂隙闭合，导致过水不畅，渗透系数变化不明显。可推出坡体界限裂隙率在 6% ~ 9%，裂隙率低于 6% 的部位跟排水工程作用有限，断面应高密度设置排水设施；而裂隙率在 9% 以上的部分，排水工程会有效果，排水管可根据实际情况布置得稀疏。因此要根据土层初始裂隙率的大小选用不同的排水设施布置方案。

3.2 不同工况下的渗透性变化

根据现场实际的工程地质状况，通过测得不同深度膨胀土含水率并将裂隙分布条件概化后得出以下数据见表 2。配制以下 5 种工况的土样，绘制成图。5 种工况的渗流变化过程如图 8 所示。

表 2 不同工况试验参数表

Table 2 Experimental parameters for different working conditions

试样	初始裂隙率/%	初始含水率/%
工况1	14.0	5
工况2	11.5	10
工况3	9.0	15
工况4	6.5	20
工况5	4.0	25

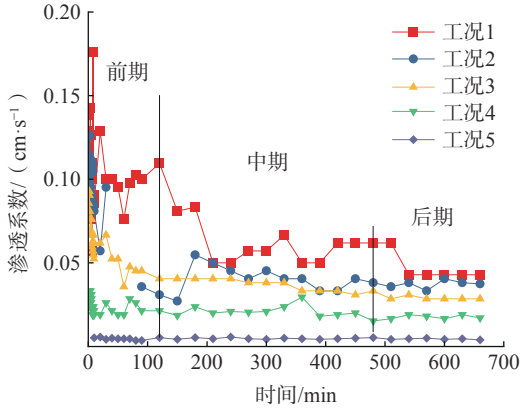


图 8 5 种不同工况渗透系数变化图

Fig. 8 Variation diagram of permeability coefficient under five different working conditions

在裂隙型膨胀土体内，含水率升高与裂隙闭合在渗透过程均伴随着土体同时发生的，因此试验中所测得的渗透系数实是土体基质吸力与水在裂隙内渗流的综合体现。

渗透初期，裂隙张开程度较大，水很容易地穿过试样内贯通的裂隙，这个时候裂隙内的渗流对土体渗透性

的贡献极大，而基质吸力只影响土体渗透性较小部分。随着土体含水率的升高，裂隙开始闭合，裂隙内的渗流急剧下降。此阶段渗透性最强，排水设施效果最好。

在渗透中期，裂隙继续闭合，5 种工况土样的渗流系数都较前期变小。由于水的渗流作用，在初期发生土体崩解的小颗粒附着在土柱间的裂隙内，造成水的渗流不畅从而降低了渗流的程度。在水的渗流过程中，土体内部不断吸水膨胀，逐渐将土体内的裂隙挤占，导致渗流不畅。土体的渗透能力下降，水分向试样内部不断渗透，也是土体不断吸水的过程，不断向饱和状态过渡。

在渗透后期，各种工况的试样的渗透系数变化均不发生明显的变化。随着时间的推移，土体内的裂隙逐渐地被淤积的土颗粒所占满。由于膨胀土吸水膨胀的特性，经过长时间的浸润作用，土体的含水率已经接近饱和状态，过水通道的数量有限，导致水只能从土体极其微小的裂隙中流进，渗透程度降到较低的水平。实际工程中排水设施排水效果有限。

4　结论

（1）在初始裂隙率一定的情况下，土体的起始渗透系数随着初始含水率的增加而增加。初始含水率越低的土，基质吸力大，吸水后迅速膨胀导致渗透性变差，土体含水率影响着土体内裂隙的产生与发展。随着渗透时间的增长，试样的渗透系数逐渐降低并稳定在某一值，且初始含水率高的试样稳定值越高，反之则越低。

（2）排水工程在渗流的前 2 h 效果最好，在 8 h 内有一定效果，超过 8 h 后效果有限。由于坡体界限裂隙率在 6% ~ 9%，因此裂隙率低于 6% 的部位排水工程作用有限，应加大排水措施密度；裂隙率在 9% 以上的部分，排水工程会有效果，增设排水措施的效果更显著。

（3）根据不同深度上的初始含水率与初始裂隙率的组合特征所总结的 5 种工况，判断相对浅层的工况下排水效果受排水时间影响明显；而相对深层的工况，初始裂隙低、初始含水量高，渗透系数变化不明显。

参考文献（References）：

[1] 宋博. 排水设施对膨胀土渠坡渗流场变化影响研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2022.［SONG Bo. Study on the influence of drainage facilities on the seepage field change of expansive soil channel slope[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.（in Chinese with English abstract）］

[2] 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. Experimental study on the relationship between water content and strength of unsaturated expansive soil on canal slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 129 － 136.（in Chinese with Englishabstract）］

[3] 蒙学礼，蒙发强，李涣森，等. 裂隙岩体非线性渗流特性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报，2020，31(4)：121 － 125.［MENG Xueli, MENG Faqiang, LI Huansen, et al. Analysis of nonlinear seepage characteristics of fractured rock mass[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 121 － 125.（in Chinese with English abstract）］

[4] 雷怡,帅飞翔,孙红月,等. 边坡负压排水非稳定流研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52 (1): 162— 170.［LEI Yi, SHUAI Feixiang, SUN Hongyue, et al. Research on unsteady flow in slope drainage under negative pressure［J］. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52 (1): 162— 170.(in Chinese with English abstract).］

[5] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Physics, 1931, 1(5): 318 － 333.

[6] 师文豪,杨天鸿. 渗流应力耦合作用下顺倾向层状边坡各向异性渗流特征数值模拟［J］. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51 (6): 1783— 1788.［SHI Wenhao, YANG Tianhong. Numerical simulation of anisotropic seepage characteristics of layered slope in the direction of inclination under coupled action of seepage stress[J]. Journal of Jilin University (Earth Sciences), 2021, 51 (6): 1783— 1788.(in Chinese with English abstract).］

[7] FIPPS G, SKAGGS R W, NIEBER J L. Drains as a boundary condition in finite elements[J]. Water Resources Research, 1986, 22(11): 1613 － 1621.

[8] ZIENKIEWICZ O C, CHEUNG Y K. Finite Element in Solution of Field Problems[J]. Water Resources Reseach, 1965, 14(2): 220 － 225.

[9] SZABO B A, MCCAIG I W. A mathematical model for transient free surface flow in nonhomogeneous or anisotropic porous media[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1968, 4(3): 5 － 18.

[10] NEUMAN C P, CASASAYAS F G. Galerkin solutions of stiff two-point boundary-value problems[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1973, 11(2): 203 － 212.

[11] FREDLUND D G. An overview of unsaturated soil behavior. Proceedings of sessions of Dallas[J]. Water Resources Reseach, 1993, 4(3): 24 － 28.

[12] THAKUR V K S, SREEDEEP S, SINGH D N. Parameters affecting soil–water characteristic curves of fine-grained soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(4): 521 － 524.

[13] AL-MAHBASHI A M, ELKADY T Y, AL-SHAMRANI M A.

Hysteresis soil-water characteristic curves of highly expansive clay[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2018, 22(9): 1041 − 1059.

[14] SILLERS W S, FREDLUND D G, ZAKERZAHEH N. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2001, 19(3): 243 − 283.

[15] SILLERS W S, FREDLUND D G. Statistical assessment of soil-water characteristic curve models for geotechnical engineering[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(6): 1297 − 1313.

[16] 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-Geroge 模型预测[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 184 − 189. [LI Ping, LI Tonglu, WANG Hong, et al. Soil-water characteristic curve and permeability perdiction on Childs & Collis-Geroge model of unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup 2): 184 − 189. (in Chinese with English abstract)]

[17] 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. Shear characteristics test of unsaturated swelling clay under freeze-thaw cycles with different initial water content[J]. Journal of Jilin University (Earth Sciences), 2021, 51(5): 1544 − 1550. (in Chinese with English abstract)]

[18] 李志清, 李涛, 胡瑞林, 等. 非饱和土土水特征曲线(SWCC)测试与预测[J]. 工程地质学报, 2007, 15(5): 700 − 707. [LI Zhiqing, LI Tao, HU Ruilin, et al. Methods for testing and predicting of swcc in unsaturated soil mechanics[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(5): 700 − 707. (in Chinese with English abstract)]

[19] 马洪波, 师占宾, 孙文. 由土—水特征曲线预测非饱和混合填料渗透系数[J]. 中国建材科技, 2018, 27(1): 74 − 77. [MA Hongbo, SHI Zhanbin, SUN Wen. Predicting coefficient of permeability from soil-water characteristic curve for Unsaturated mixed packing[J]. China Building Materials Science & Technology, 2018, 27(1): 74 − 77. (in Chinese with English abstract)]

[20] 袁俊平, 殷宗泽. 考虑裂隙非饱和膨胀土边坡入渗模型与数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1581 − 1586. [YUAN Junping, YIN Zongze. Numerical model and simulation of expansive soils slope infiltration considered fissures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1581 − 1586. (in Chinese with English abstract)]

[21] 陈铁林, 邓刚, 陈生水, 等. 裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 210 − 215. [CHEN Tielin, DENG Gang, CHEN Shengshui, et al. Effects of fissures on stability of unsaturated soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 210 − 215. (in Chinese with English abstract)]

[22] 吕建航,杨忠年,时伟,等. 冻融循环下加筋膨胀土边坡稳定性模型试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1587— 1596. [LYU Jianhang, YANG Zhongnian, SHI Wei, et al. Model test on stability of reinforced expansive soil slope under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Jilin University (Earth Sciences), 2021, 51 (5): 1587— 1596.(in Chinese with English abstract).]

[23] 王玮, 钱家忠, 马雷, 等. 基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 82 − 89. [WANG Wei, QIAN Jiazhong, MA Lei, et al. A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 82 − 89. (in Chinese with English abstract)]

[24] 袁俊平. 非饱和膨胀土的裂隙概化模型与边坡稳定研究[D]. 南京: 河海大学, 2003. [YUAN Junping. Study on generalized fracture model and slope stability of unsaturated expansive soil[D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese with English abstract)]

[25] 施斌, 唐朝生, 王宝军, 等. 粘性土在不同温度下龟裂的发展及其机理讨论[J]. 高校地质学报, 2009, 15(2): 192 − 198. [SHI Bin, TANG Chaosheng, WANG Baojun, et al. Development and mechanism of desiccation cracking of clayey soil under different temperatures[J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(2): 192 − 198. (in Chinese with English abstract)]