文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

# 裂隙粘土的渗透特性研究——以南四湖为例

王志东[1]　王倩[2]　张子凡[2]
1 黄河水利委员会府谷水文水资源勘测局　2 河海大学岩土工程研究所
DOI:10.12238/hwr.v9i8.6524

[摘　要] 裂隙粘土因其特殊的裂隙-孔隙网络结构表现出显著的渗透性差异,对地质灾害防治与堤坝工程的渗透性研究具有重要意义。本文以南四湖西姚站为研究区域,通过探坑开挖试验、微水冲击试验及示踪试验,分析裂隙粘土的渗透特性及其影响机制。研究发现,上层土体由于植物根茎遗留的孔洞和裂隙发育,具有较高的渗透性；下层土体尽管孔洞较多,但连通性差,渗透性受到一定限制；探坑底部土层在地下水长期侵蚀和冲刷作用下,孔洞体系贯通性良好,渗透性显著增强。微水冲击试验定量反映了不同土层的渗透能力差异。研究结果为南四湖堤防工程的渗透性评估及防渗加固设计提供了重要参考。
[关键词] 裂隙粘土；渗透特性；探坑开挖试验；微水冲击试验；孔隙网络
**中图分类号**：TV543+.81　**文献标识码**：A

## Study on the Permeability Characteristics of Fissured Clay: A Case Study of Nansi Lake

Zhidong Wang[1]　Qian Wang[2]　Zifan Zhang[2]
1 Fugu Hydrological and Water Resources Survey Bureau of the Yellow River Conservancy Commission
2 Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University

[Abstract] Fissured clay exhibits significant permeability differences due to its unique fissure-pore network structure, which is critical for understanding geological hazard prevention and seepage studies in dam engineering. Using the Xiyao Station of Nansi Lake as the research area, this study analyzes the permeability characteristics and influencing mechanisms of fissured clay through pit excavation tests, micro-water impact tests, and tracer tests. The findings reveal that the upper soil layer, characterized by the presence of cavities and developed fissures from plant root residues, demonstrates high permeability. In contrast, the lower soil layer, despite having many cavities, shows limited permeability due to poor connectivity. The bottom layer of the excavation pit, subject to long-term groundwater erosion and scouring, exhibits a well-connected cavity system and significantly enhanced permeability. The micro-water impact test quantitatively reflects the differences in permeability among soil layers. The results provide valuable insights for seepage evaluation and anti-seepage reinforcement design in the Nansi Lake embankment projects.
[Key words] Fissured clay; Permeability characteristics; Pit excavation test; Micro-water impact test; Pore network

## 前言

裂隙粘土因其发育的裂隙-孔隙网络而展现出高渗透性,其研究对于边坡稳定性、堤坝稳定性及地质灾害防治具有重要意义。裂隙的存在使裂隙土渗透系数显著高于均质土,成为水分流动的主要通道。裂隙土的渗透特性受到裂隙网络发育程度及孔隙结构的显著影响,是土力学和岩土工程的研究重点。洪勃等[1]通过黄土裂隙的渗透试验指出裂隙显著增强了水流的优先性,并形成渗透各向异性特征。王文东[2]在研究赣南红土时发现,干缩裂隙的几何特性显著影响非饱和渗透系数,并结合动态多步溢出法与回归分析建立了定量化预测模型。此外,侯晓萍等[3]基于COMSOL数值模拟裂隙-基质耦合作用,揭示了裂隙优先流与基质吸收的动态平衡,并分析了裂隙几何特性对渗流主导模式的影响。雷炳霄等[4]结合现场试验和CT扫描,明确了裂隙-孔隙管道体系对渗透性的主导作用,进一步验证了大孔隙比对高渗透性的促进作用。

裂隙动态发育及其环境影响在试验与理论研究中得到了深入探讨。谭睿[5]利用离散元方法分析干缩裂隙蒸发效应,强调裂隙扩展对渗透规律的强化作用。常凯[6]通过盐分与裂隙试验研究,指出裂隙深度和埋深显著影响水分入渗特性及湿润体积,提出裂隙参数与渗透行为的耦合机制。郭金喜等[7]研究了裂隙网

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

络的动态发展,发现降雨入渗时裂隙对优先通道的形成有显著影响,并利用双峰特性分析裂隙网络对渗透行为的控制效应。此外,豆红强等[8]基于裂隙孔隙双峰特性模型,探讨了降雨条件下裂隙土渗流的时空分布规律,为裂隙网络的渗流分析提供了新的方法。

裂隙黏土的渗透特性因其裂隙-孔隙系统的复杂性和区域差异性,在不同地质条件下表现出显著的变化特点。基于此,本文以南四湖地区为研究背景,针对裂隙发育的特殊性,设计并开展了深坑开挖试验和微水冲击试验,结合现场与室内试验手段,进一步探讨了裂隙土在区域性条件下的渗透特性及其影响机制,为裂隙土渗透特性在地质灾害防治和工程应用中的理论研究提供科学依据。

## 1 试验方法

南四湖是我国第六大淡水湖,其堤防工程对区域防洪和供水具有重要作用。然而,该地区裂隙粘性土具有区域特性,对南四湖蓄水、汛防有直接的影响,加之该地区在土层渗透特性方面研究资料尚不完善,使对该特殊粘性土的研究具有重要的工程意义。试验主要针对深度范围为6m内的第一层土开展研究工作,试验点选择西姚站。西姚站位于南四湖中游东鱼河、复兴河及昭阳湖交界处,探坑选址于湖西大堤背水侧堤脚附近。该区域堤基未进行混凝土防渗墙加固,而是采用夯实粘土防渗。

1.1探坑开挖试验

西姚站探坑规格为4m×2.66m×2.5m,具有一段斜坡台。开挖至地下水位以下1.0m,观察渗水和涌水现象,并记录土体特性(如裂隙、孔洞、植物根茎)。在探坑完成后,水位抽至坑底,保持水位稳定,记录水位随时间的恢复变化。根据《供水水文地质勘察规范》,稳定流抽水试验或非稳定流抽水试验,当利用水位恢复资料计算渗透系数时,若停止抽水前动水位基本没有稳定,仍呈直线下降时,采用下列公式:

$$K=\frac{Q}{2\pi\ (\mathrm{H}^2-h^2)}\ln(1+\frac{t_k}{t_T}) \tag{1}$$

其中,$H$ 为自然情况下潜水含水层的厚度,$h$ 为水位恢复时的潜水含水层厚度,$Q$ 为出水量,$t_k$ 为抽水开始到停止的时间,$t_T$ 为抽水停止时算起的恢复时间。

观察并记录探坑内土体的裂隙、孔洞及涌水特点,包括孔洞直径、涌水分布、裂隙形态和扩展趋势。对塌落的土样进行分析,包括裂隙纹路、孔洞形态、植物根茎遗留情况等。

在探坑周围布设钻孔,西姚站布设2个钻孔。钻孔尺寸数据如表1所示。钻孔位置选在探坑附近,以便评估地下水和土体结构的连通性。钻孔深度为3.4-10.3m,钻孔直径为130mm,完成钻孔后记录水位埋深。选择钻孔进行染料示踪,将红色染料(示踪剂)按比例混合后注入钻孔,模拟地下水流动路径。观察探坑壁、坑底等部位的染色情况,记录裂隙和孔洞中的染色范围、分布形态及示踪剂扩散时间。重点记录示踪剂扩散到裂隙和孔洞的速度与连通范围,结合地下水位变化分析土体渗透性。在注入示踪剂后的3分钟、10分钟、30分钟等关键时间点对裂隙和孔洞的染色情况拍照,并拨开表层土体确认内部染色形态。通过显现的染色区域分析裂隙发育阶段、连通性以及土体渗透通道的特征。

表1 钻孔尺寸概况

| 孔号 | 孔深/m | 水位埋深/m | 滤管长度/m |
|---|---|---|---|
| K1 | 10.3 | 5.77 | 4 |
| K2 | 5.5 | 0.6 | 2 |

1.2微水冲击试验

在探坑及钻孔位置选取不同深度进行微水冲击试验。通过瞬时注水或抽水,使钻孔内水位发生微小变化,记录水位恢复过程,研究含水层的渗透特性。利用高精度测量仪器记录水位随时间的恢复曲线,并绘制时间与水头压力变化的对数关系曲线。测量数据通过公式计算渗透系数:

$$\ln\left[\frac{\mathrm{H(t)}}{\mathrm{H_0}}\right]=-\frac{2\mathrm{KBt}}{\mathrm{r_c}^2\ln\left(\mathrm{R_e}/\mathrm{r_w}\right)} \tag{2}$$

其中,$\mathrm{r_c}$ 为钻孔套管半径,$\mathrm{B}$ 为含水层厚度,$H(t)$ 为$t$时刻的压力水头,$H_0$ 为初始压力水头,冲击试验影响半径$\mathrm{Re}$经验值取滤管长度,滤管长度根据各钻孔实际条件确定(2m至4.5m不等)。

在每个钻孔进行1-3组试验,记录注水前后的水位变化,计算渗透系数并进行平均值分析。绘制$\ln\left[\frac{\mathrm{H(t)}}{\mathrm{H_0}}\right]$与时间的关系曲线,提取直线段斜率用于渗透系数计算。分析各钻孔渗透性差异,结合探坑和示踪剂试验结果进行综合评价。

## 2 试验结果与分析

2.1土体结构特性

探坑开挖至1.1m深度时即出现渗水现象,1.6m时渗水量明显增大,探坑底部以下的四壁分布着大量孔洞和裂隙,孔洞直径约为3mm,连通性强。裂隙呈现脉络状,主裂隙宽度约0.5mm,次裂隙宽度约0.1mm,部分裂隙表面光滑且有锈染特征,少量裂隙内含有植物根茎。开挖完成后,水位恢复迅速,表明地下水具有较强的补给能力。抽水过程中,坑壁裂隙在渗水压力作用下扩展,最终引发土体坍塌。坍塌土块呈拳头大小,部分土块表面光滑,有明显的裂隙纹路。

2.2深坑开挖试验结果

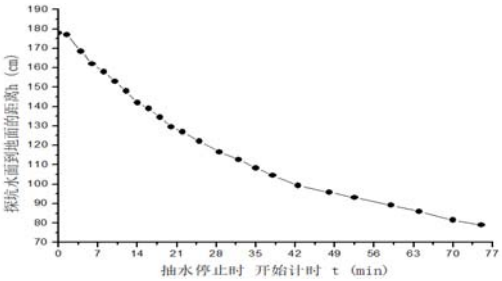
根据水位恢复试验,可以绘出西姚探坑水位恢复随时间的变化如图1所示,西姚探坑水位恢复估算如表2所示。西姚站附近渗透系数数学平均值为$2.52\times10^{-2}$cm/s,则西姚上层土体具有强透水性。一般粘性土颗粒粒径小、孔隙率较小,渗透系数为$5.79\times10^{-5}$cm/s,而此裂隙粘土由于其具有独特的矿物及土颗

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

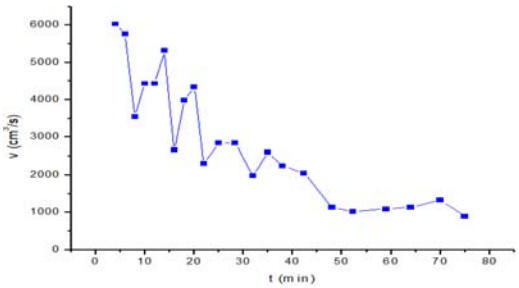
表2 西姚探坑水位恢复估算成果

| $t_{T\ (sec)}$ | $T_{k(sec)}$ | Ln/(1+Tk/tT) | H/m | h/m | $H^2-h^2$ | Q/($m^3$/s) | K/(cm/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 90 | 1500 | 2.87 | 4.4 | 3.23 | 8.93 | 9.72E-03 | 4.98E-02 |
| 240 | 1500 | 1.98 | 4.4 | 3.315 | 8.37 | 9.72E-03 | 3.66E-02 |
| 360 | 1500 | 1.64 | 4.4 | 3.38 | 7.94 | 9.72E-03 | 3.20E-02 |
| 480 | 1500 | 1.42 | 4.4 | 3.42 | 7.66 | 9.72E-03 | 2.86E-02 |
| 600 | 1500 | 1.25 | 4.4 | 3.47 | 7.32 | 9.72E-03 | 2.65E-02 |
| 720 | 1500 | 1.13 | 4.4 | 3.52 | 6.97 | 9.72E-03 | 2.50E-02 |
| 840 | 1500 | 1.02 | 4.4 | 3.58 | 6.54 | 9.72E-03 | 2.42E-02 |
| 960 | 1500 | 0.94 | 4.4 | 3.61 | 6.33 | 9.72E-03 | 2.30E-02 |
| 1080 | 1500 | 0.87 | 4.4 | 3.655 | 6.00 | 9.72E-03 | 2.25E-02 |
| 1200 | 1500 | 0.81 | 4.4 | 3.704 | 5.64 | 9.72E-03 | 2.23E-02 |
| 1320 | 1500 | 0.76 | 4.4 | 3.73 | 5.45 | 9.72E-03 | 2.16E-02 |
| 1500 | 1500 | 0.69 | 4.4 | 3.778 | 5.09 | 9.72E-03 | 2.11E-02 |
| 1710 | 1500 | 0.63 | 4.4 | 3.834 | 4.66 | 9.72E-03 | 2.09E-02 |
| 1920 | 1500 | 0.58 | 4.4 | 3.873 | 4.36 | 9.72E-03 | 2.05E-02 |
| 2100 | 1500 | 0.54 | 4.4 | 3.917 | 4.02 | 9.72E-03 | 2.08E-02 |
| 2280 | 1500 | 0.51 | 4.4 | 3.955 | 3.72 | 9.72E-03 | 2.10E-02 |
| 2550 | 1500 | 0.46 | 4.4 | 4.007 | 3.30 | 9.72E-03 | 2.17E-02 |
| 2880 | 1500 | 0.42 | 4.4 | 4.042 | 3.02 | 9.72E-03 | 2.15E-02 |
| 3150 | 1500 | 0.39 | 4.4 | 4.068 | 2.81 | 9.72E-03 | 2.14E-02 |
| 3540 | 1500 | 0.35 | 4.4 | 4.108 | 2.48 | 9.72E-03 | 2.20E-02 |
| 3840 | 1500 | 0.33 | 4.4 | 4.14 | 2.22 | 9.72E-03 | 2.30E-02 |
| 4200 | 1500 | 0.31 | 4.4 | 4.185 | 1.85 | 9.72E-03 | 2.56E-02 |
| 4500 | 1500 | 0.29 | 4.4 | 4.21 | 1.64 | 9.72E-03 | 2.72E-02 |

粒组成，使其在经历特定时间后，土体内部出现裂隙和孔洞，裂隙从小、少、短慢慢发展，使其土体内部裂隙隙径增大；由于该土体本身的形成伴随有少量孔洞，上层土体内部充斥着植物根茎，根茎腐烂后遗留下根茎状的孔洞，加之湖水的渗透作用，使孔壁细小、不稳定的土粒在水的作用下被带走。随着孔洞和裂隙的发育，它们之间逐渐贯通，形成清晰地“纹络状”结构，导致该土层渗透系数远超过一般的裂隙粘土。



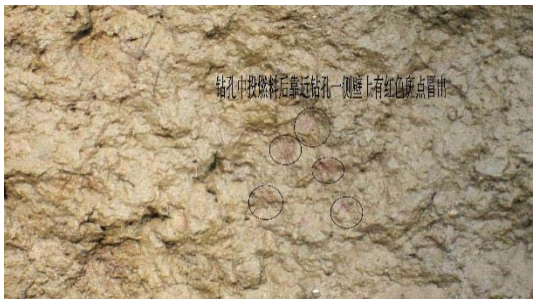

(a)西姚探坑水位恢复随时间的变化




(b)西姚探坑单位时间恢复随时间的变化

图1 西姚探坑水位恢复试验结果

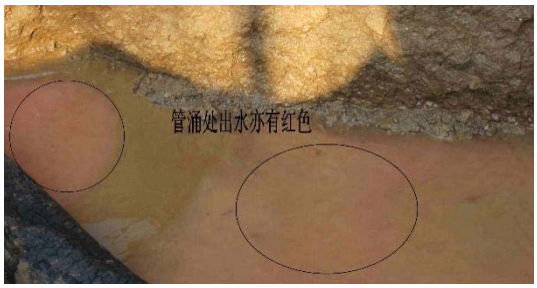
将红色示踪剂按一定的配比混合均匀，并投入钻孔中观察坑壁及探坑底部变化情况，钻孔示踪试验描述如图2所示。




(a)坑壁上有红色斑点冒出

(b)拨开有红色斑点土壁

(c)示踪剂从孔洞流出



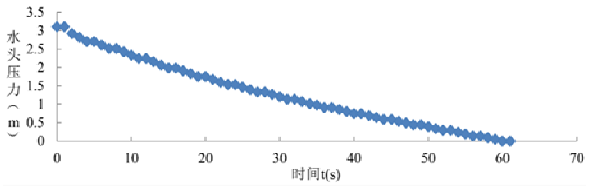

(d)管涌处出水为红色

图2 示踪试验描述

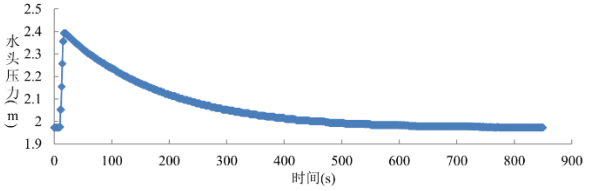
如图2(a)和图2(b)所示，3分钟后在靠近钻孔的坑壁上约1m及以上区域可见到大量红色斑点，斑点开始呈点状，过一段时间后，慢慢扩大。拨开表面有红色示踪剂的土壁大多发现里面有好多植物根茎，根茎的表面呈红色。土壁表面有少量示踪剂从孔洞中流出，但整个土壁只发现一个孔洞有这种现象，此孔洞位于探坑底部，距离地面2m处，孔洞表面附着有植物腐根(图2(c))，但坑底发生管涌处可见明显的红色水不断冒出(图2(d))。

染料示踪结果表明，上层粘土层由于受到植物根茎的影响，渗透系数较大，而下层粘土虽然有很多孔洞，但连通性较差，该土层仅处于裂隙发育阶段的前期，但探坑底部多处不断有示踪剂随着管涌流出，说明坑底土层受到地下水的侵蚀，底部已经形成有连通性很好的孔洞，示踪剂可以顺利通过地下孔洞自下向上扩散，且很容易就形成涌水。

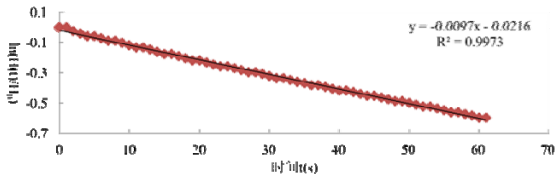
2.3微水冲击试验结果



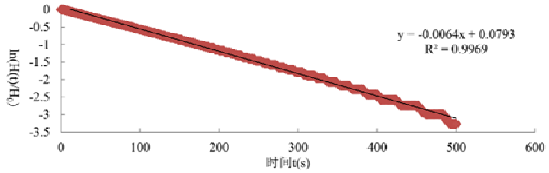

(a)K1微水冲击试验水位恢复曲线




(b)K2微水冲击试验水位恢复曲线




(c)K1水位恢复参数与时间的关系曲线




(d)K2水位恢复参数与时间的关系曲线

图3 微水冲击试验经过

K1钻孔完成后孔内水位在地面以下5.77m,孔深10.3m,微水冲击试验是在孔内水位以上1.97m位置,转化为0.25m时的数据。K2钻孔完成后孔内水位在地面以下0.60m,孔深5.5m。K1和K2钻孔的水位恢复曲线如图3(a)和图3(b)所示,K1钻孔最高水位为3.1m(注水至管口,管口有0.5m),K2钻孔注水前水位为1.973m,注水后最高水位为2.392m,水位恢复时间约为10分钟。钻孔的水位恢复参数与时间的关系曲线如图3(c)和图3(d)所示,根据式(2)可得,K1钻孔渗透系数为$1.62\times10^{-3}$ cm/s,K2钻孔渗透系数为$8.90\times10^{-4}$ cm/s。

2.4试验结果分析

上述试验结果表明,西姚站土体的渗透特性与其独特的结构特性密切相关,且存在显著的空间异质性。在探坑开挖过程中,渗水现象最早出现在距地表1.1m处,开挖至1.6m深度时渗水量显著增加,同时探坑四壁发现大量孔洞与裂隙。裂隙呈脉络状分布,主裂隙宽度达0.5mm,次裂隙宽度约为0.1mm,孔洞直径平均为3mm,这些结构的连通性较强。部分裂隙表面光滑且带有锈染特征,裂隙内含植物根茎的现象揭示了植被对裂隙发育的作用。通过示踪结果,可以看出上层粘土因植物根茎遗留孔洞及裂隙发育具有较高的渗透系数,而下层粘土虽孔洞分布广泛,但由于孔洞间连通性较差,渗透性受到限制。探坑底部的管涌现象以及示踪剂从孔洞涌出的表现,表明底部土层在地下水长期侵蚀下已形成贯通性良好的孔洞体系。结合探坑底部的水流路径分析,地下水的侵蚀与冲刷作用导致孔洞壁面土粒被带走,使底部土层的渗透性显著增强。

微水冲击试验的结果定量反映了区域土层的渗透能力差异。K1钻孔更靠近探坑底部的土层,因水流侵蚀与裂隙贯通性增强,渗透能力更高。

## 3 结论

通过对南四湖西姚站裂隙粘性土的渗透性研究发现,该区域土体具有显著的空间异质性和独特的渗透特性。上层土体由于植物根茎遗留的孔洞和裂隙发育呈现高渗透性,而下层土体虽孔洞发育,但连通性较差,渗透性受到一定限制;探坑底部土层在地下水长期侵蚀和冲刷作用下,形成贯通性良好的孔洞体系,导致渗透性显著增强。微水冲击试验结果进一步量化了区域土体渗透能力的差异,揭示了裂隙和孔洞发育对渗透系数的重要影响,为南四湖堤防渗透性评估和防渗加固提供了重要参考。

## [参考文献]

[1]洪勃,杜少少,李喜安,等.泾河南塬黄土的渗透特征及孕灾机制[J].水土保持通报,2019,39(03):75-79.

[2]王文东.裂隙对赣南地区红土水力特性影响研究[D].南昌大学,2023.

[3]侯晓萍,樊恒辉.基于COMSOL Multiphysics的非饱和裂隙土降雨入渗特性研究[J].岩土力学,2022,43(02):563-572.

[4]雷炳霄,李俊,吴佳伟,等.济南富水裂隙黏性土的渗透特性试验研究[J].路基工程,2023,(03):68-72.

[5]谭睿.裂隙黏土的干缩开裂机制与力学特性研究[D].武汉大学,2019.

[6]常凯.裂隙土入渗过程水盐迁移特征及数值模拟[D].西北农林科技大学,2023.

[7]郭金喜,易远.裂隙土渗流模型研究进展综述[J].土工基础,2017,31(06):721-724.

[8]豆红强,韩同春,龚晓南.降雨条件下考虑裂隙土孔隙双峰特性对非饱和土边坡渗流场的影响[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S2):4373-4379.

## 作者简介：

王志东(1978--),男,汉族,陕西靖边人,本科,工程师,研究方向：水文水资源管理。