

# 降雨优势入渗下浅埋偏压黄土隧道变形破坏机理分析

唐琨杰, 邱军领\*, 赖金星, 贾玎, 崔冠华, 胡昊然

(长安大学公路学院, 陕西西安 710064)

**摘要:** 水环境的改变是诱发黄土隧道灾害的主要因素, 而优势通道的存在对于围岩中水分入渗起到重要作用。以偏桥隧道为工程背景, 在现场调研的基础上, 通过开展物理模型试验和数值模拟探究了降雨期间优势通道的演化过程、入渗特征及隧道结构响应规律, 进一步揭示了裂隙优势入渗诱发黄土隧道变形破坏机理。结果表明: 优势通道的孕育发展是“新”裂隙的形成与“旧”裂隙的延伸扩大共同耦合作用下的结果。在优势通道影响下, 入渗模式从稳态入渗逐渐转变为裂隙控制的优势流入渗, 改变围岩水分迁移路径的同时加快了水分渗入深部围岩。随着裂隙深度的增加, 优势渗流影响范围越来越大, 浸润锋形态逐渐由“曲线型”变为“漏斗型”。裂隙末端形成的局部暂饱和区加剧了围岩变形, 使得隧道受力表现出明显的不对称性, 其中优势运移通道下侧隧道结构所受影响最为突出。当出现贯通裂隙时, 优势入渗所引起的隧道拱顶沉降达到 56.3 mm, 结构应力增值相较于均匀入渗增大 140 kPa。

**关键词:** 黄土隧道; 浅埋偏压; 优势入渗; 水分迁移; 破坏机理

中图分类号: U451 文献标识码: A 文章编号:

作者简介: 唐琨杰(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: tangkunjie@chd.edu.cn。

## Analysis of deformation and failure mechanism of shallow buried bias loess tunnel induced by fracture dominant infiltration under rainfall environment

TANG Kunjie, QIU Junling\*, LAI Jinxing, JIA Ding, CUI Guanhua, HU Haoran

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** The change of water environment is the main factor inducing loess tunnel disasters, and the existence of dominant channels plays an important role in the infiltration of water into the surrounding rock. Taking the Pianqiao Tunnel as the engineering background, based on on-site research, the evolution process, infiltration characteristics of dominant channels, and tunnel structural response laws during rainfall were explored through physical model experiments and numerical simulations, further revealing the deformation and failure mechanism of loess tunnels induced by crack dominant infiltration. The results indicate that the development of dominant channels are the result of the coupling effect of the formation of "new" cracks and the extension and expansion of "old" cracks. Under the influence of dominant channels, the infiltration mode gradually changes from steady-state infiltration to fissure controlled dominant infiltration, changing the migration path of surrounding rock water while accelerating water infiltration into deep surrounding rock. As the depth of the crack increases, the range of influence of dominant infiltration becomes larger, and the infiltration front gradually changes from "curved" shape to "funnel-shaped" shape. The local temporary saturation zone formed at the end of the crack intensifies the deformation of the surrounding rock, resulting in a significant asymmetry in the stress distribution of the tunnel, with the tunnel structure under the dominant channels being most affected. When a through crack appears, the settlement of the vault caused by dominant infiltration reaches 56.3 mm, and the structural stress increases by 140 kPa compared to uniform infiltration.

**Key words:** Loess tunnel; Shallow buried bias; Dominant infiltration; Water migration; Failure mechanism

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52208386); 国家自然科学基金面上项目(51978066, 52278393); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(300102213202)

收稿日期: 2024-08-26

\*通讯作者 (E-mail: junlingqiu@chd.edu.cn)

## 0 引言

黄土是在干燥条件下形成的一种富含孔隙、结构疏松、垂直节理发育、一般具有不同程度湿陷性的第四纪特殊沉积物，在我国分布广泛<sup>[1]</sup>。由于黄土具有特殊的岩土工程性质（大孔隙性、水敏性、结构性），水环境的改变成为诱发黄土工程灾害的主要因素<sup>[2]</sup>。特别是在强降雨条件下，非均匀分布的连通裂隙和大孔洞是水分迁移的主要通道<sup>[3]</sup>。优势通道的存在改变了水分迁移路径，使得水分沿着优势渗流通道可入渗至深部土层<sup>[4-5]</sup>；对于隧道工程，当水分入渗至隧道埋深范围内，隧道结构安全便会受到严重威胁。

因此，探究优势入渗的渗流特征和黄土失稳破坏机理已成为国内外学者关注的热点。赵宽耀等<sup>[6]</sup>研究发现黄土潜在的隐伏裂隙可为渗流提供优势通道，并揭示了在高强灌漑入渗模式下黄土地层中优势渗流特征。Qin 等<sup>[7]</sup>通过试验和理论推导研究了优势入渗作用下黄土地层的渗流演化过程，并推导出了渗流扩散范围的解析解。此外，付敬<sup>[8]</sup>等研究表明滑坡内的裂隙又为雨水下渗提供快速通道，雨季强降雨将在坡体裂隙较发育的部位汇集形成暂态水源，暂态水源产生的附加水荷载成为非饱和边坡在雨季失稳的控制因素。张永双等<sup>[9]</sup>探讨了裂隙在不同深度、发育位置及数量下的入渗特征，并分析了其对滑坡渗流场的影响。

Kukemilks 等<sup>[10]</sup>构建了包含优势流入渗的边坡模型，研究发现考虑优势渗流后，边坡的稳定性出现明显下降。黄晓虎等<sup>[11]</sup>分析了优势入渗下坡体的稳定性，并厘清了优势流入渗诱发浅层破坏机理。张昭<sup>[12]</sup>等基于 Green-Ampt 入渗模型推导了表征雨水在土体裂隙内优势入渗过程的解析模型。邱军领等<sup>[13]</sup>通过 COMSOL Multiphysics 模拟了双通道渗流效应，并探究了降雨入渗情况下含裂隙土体的隧道围岩变形特征。

综上所述，目前对优势入渗诱发黄土工程灾害研究大多集中于边坡工程，在降雨优势入渗对浅埋偏压黄土隧道稳定性研究方面亟需补充。鉴于此，本文以偏桥隧道为工程背景，在现场调研的基础上，通过开展物理模型试验和数值模拟探究降雨期间优势通道的演化过程、入渗特征及隧道结构响应规律，揭示裂隙优势入渗诱发黄土隧道变形破坏机理。以期为深化认识降雨裂隙优势入渗下黄土隧道失稳机制，提升黄土隧道容灾抗灾能力提供一定参考依据。

## 1 工程背景

偏桥隧道位于陕西省延安市，是延安东绕城高速公路的重点控制工程之一。隧道断面宽 12.77 m，高 9.5 m，隧道净空面积为 69.94 m<sup>2</sup>，属于大断面黄土隧道。受地形和水流侵蚀影响，隧道洞口段形成了明显的冲沟地貌。通过现场勘查，洞口段地层从上到下主要为马兰黄土（Q3<sup>eol</sup>）、离石黄土（Q2<sup>eol</sup>）和粉质粘土（Q2<sup>al+pl</sup>），隧道地理位置及地质纵断面如图 1 所示。根据延安水文站近年来的降雨监测数据（图 2a），发现研究区 85%~94% 的降雨发生在雨季（5~10 月）。从历史上看，一些地区的最大降雨强度可以达到 75 mm/h。

（5~10 月）。从历史上看，一些地区的最大降雨强度可以达到 75 mm/h。

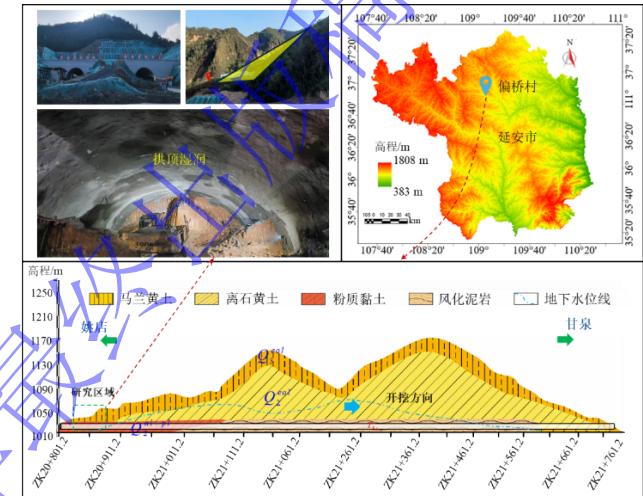


图 1 隧道地理位置及地质纵断面图

Fig.1 Geographical location and geological profile of the tunnel

对于浅埋黄土隧道，在施工过程中，在隧道顶部影响范围内的围岩会形成新的节理、裂缝和潜在的贯通裂隙（图 2c）。偏桥隧道洞口段属于典型的浅埋偏压段，开挖过程中隧道承受的偏压荷载会导致非偏压一侧地表裂隙迅速发展<sup>[14]</sup>。降雨对裂隙的发展起着重要作用，降雨过程中在渗流侵蚀作用下裂隙不断延伸扩大，数量不断增多，此时雨水沿裂隙扩展形成的优势通道发生集中入渗（图 3）。当雨水沿裂隙入渗至隧道埋深时，持续的强降雨会导致隧道发生严重的变形破坏。当上台阶开挖至 ZK20 + 849 时，在强降雨作用下掌子面、拱脚和边墙部位出现渗水涌泥，通过现场测试分析，降雨后围岩质量含水率可达 32%（图 2b），随后拱顶及拱墙处围岩发生坍塌及掉块现象。此外，初期支护混凝土多处被挤压掉块，暴露出来的初支钢拱架已扭曲变形（图 2c）。实测初期支护最大侵入二衬达 80 cm，拱顶围岩发生剧烈的垮塌变形导致地表开裂，形成纵向裂缝。

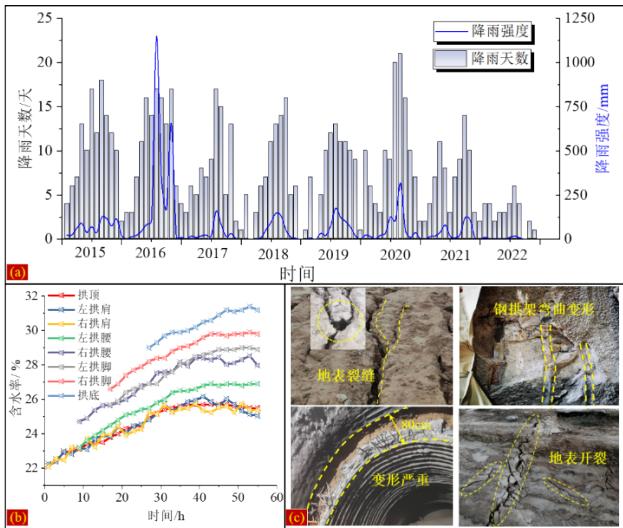


图2 研究区水文气象条件及隧道变形破坏特征

Fig.2 Hydrometeorological conditions and tunnel deformation failure characteristics in the study area

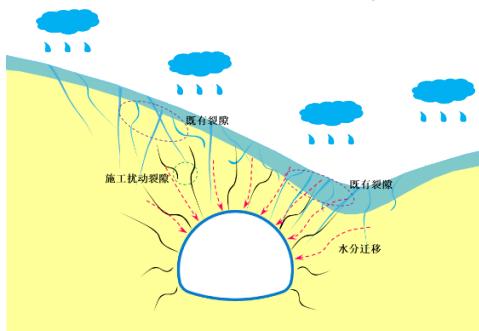


图3 黄土优势入渗示意图

Fig.3 Schematic map of loess dominant infiltration

## 2 物理模型试验

现场调研结果表明：当雨水沿裂隙入渗至隧道洞口段埋深时，持续的强降雨会对施工过程中隧道结构产生严重影响。而降雨期间优势通道是如何形成的呢？因此，本章在现场调研的基础上，通过开展相似模型试验对降雨期间优势通道的演化过程及隧道结构响应规律展开探究。

### 2.1 相似常数确定

采用量纲分析法，将几何尺寸( $l$ )、渗透系数( $k$ )和重度( $\gamma$ )作为本次试验的基本物理量。最终选取几何相似比 $C_l=50$ ，重度相似比 $C_\gamma=1$ ，渗透系数相似比 $C_k=1$ ，计算得出各物理量参数相似比(表1)。

表1 物理参数相似比

Table 1 Similarity ratios of physical parameters

物理量	量纲	相似关系	相似比
长度 $l$	$L$	$C_l=50$	50
重度 $\gamma$	$MT^{-2}L^{-2}$	$C_\gamma=1$	1
渗透系数 $k$	$T^{-1}L$	$C_k=1$	1
应力 $\sigma$	$MT^{-2}L^{-1}$	$C_\sigma=C_lC_\gamma$	50

弹性模量 $E$	$MT^{-2}L^{-1}$	$C_E=C_\sigma$	50
时间 $t$	$T$	$C_t=C_\gamma/C_k$	50

### 2.2 相似材料研制

为尽可能准确的模拟原状黄土，总结前人经验<sup>[15]</sup>以及综合考虑材料本身的特性，本次模型试验选取膨润土作为胶结材料，石英砂作为填充材料，以及石英粉及石膏共同组成配制黄土的相似材料(图4)。现场测试表明原状黄土的含水率在21%左右，在该模型试验中，通过渗透试验、单轴和直剪试验测试相似材料的物理力学参数，最终以渗透系数、摩擦角、黏聚力和弹性模量作为主要控制指标进行配比选取。以偏桥隧道现场的围岩物理力学性质为参照标准，经过多次试验，最终选定的相似材料配比为：膨润土：石英砂：石英粉：石膏：水：30：20：35：8：11。原状黄土及相似材料的物理力学参数见表2。

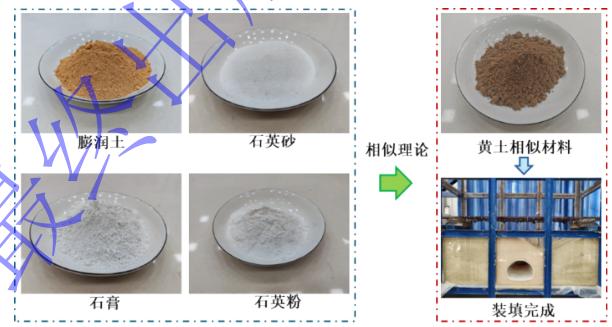


图4 黄土相似材料配制

Fig.4 Preparation of Similar Loess Materials

表2 原状黄土与相似材料的物理力学参数

Table 2 The physical and mechanical parameters of the tunnel surrounding rock and prepared loess similar materials

围岩种类	渗透系数 (m/s)	摩擦角 (°)	弹性模量 (MPa)	黏聚力 (kPa)
原状黄土	$2.1 \times 10^{-5}$	25	8.5	28
相似材料	$2.0 \times 10^{-5}$	24	8.2	30

偏桥隧道初期支护为C25喷射混凝土，衬砌的弹性模量为28 GPa，单轴抗压强度为16.7 MPa。选用以水、石膏和硅藻土为主要基材配制衬砌支护材料(图5)。最终选取水：石膏：硅藻土为1：1.3：0.1作为混凝土衬砌材料配比。

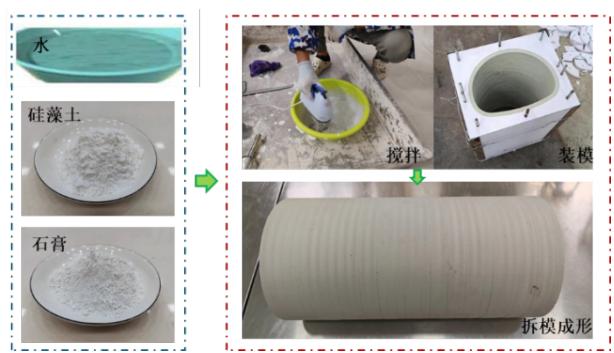


图 5 隧道模型制作

Fig.5 Preparation of tunnel lining similar materials

## 2.3 试验装置及试验过程

降雨物理模型试验系统主要由模型箱、人工降雨模拟系统和多场监测系统组成。模型箱的尺寸为长 1.5 m、宽 0.5 m、高 2.0 m。为了观察围岩内部的状态，模型箱采用钢化玻璃和钢条进行组装。人工降雨模拟系统由水箱、水泵和降雨喷嘴组成。在隧道模型上方搭建降雨框架，每个框架安装了八个降雨喷嘴。相邻降雨喷嘴之间的距离为 0.2 m，边缘降雨喷嘴距离模型边界 0.1 m。试验降雨强度设置为 1.2 mm/min（相当于 72 mm/h），以接近研究区域 75 mm/h 的历史最大降雨强度。为获取围岩内部状态和隧道结构内力信息，选取隧道中间断面作为监测断面安装传感器。另外，在距模型箱 2 m 处放置一台索尼相机，以记录试验过程中浸润锋及内部围岩的变化情况。选取隧道中间断面作为监测断面，降雨物理模型试验系统及监测断面传感器布局如图 6 所示。

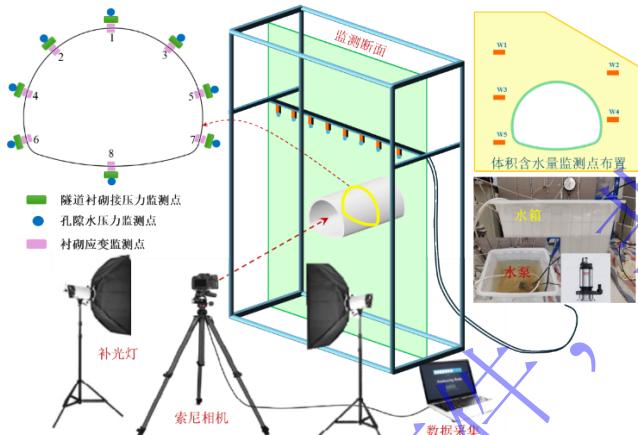


图 6 降雨物理模型试验系统及监测断面传感器布局

Fig.6. Configuration of the rainfall physical model experiment system and layout of monitoring sensors

试验前，完成土压力盒和孔隙水压力传感器的参数标定和应变片电阻值的统一。在试验过程中，将相似材料每隔 10 cm 填充到模型箱中，然后使用橡胶锤逐层压实找平。利用红外水平仪确定每个监测元件的具体位置，并在相应位置埋设传感器。模型箱内相似材料填充找平完成后，静置 24 h，使模型达到初始平衡。然后，记录所有监测仪器的初始读数，开始降雨试验。试验结束后将试验数据根据相似比计算出实际值进行试验结果分析。

## 2.4 试验结果分析

### 2.4.1 浸润锋及体积含水率

浸润锋的时空分布特征如图 7 所示。降雨初期水分主要沿垂直方向向下入渗，浸润锋底部相对光滑。降雨 5 d 后，浸润锋到达隧道右拱肩处，随后浸润锋

到达隧道埋深。由于衬砌起到屏障作用，改变了浸润锋的迁移方向和范围，使得浸润锋沿隧道轮廓线从两侧向隧道底部快速渗透，在底部形成一个持续向外扩散的入渗源。此外，随着降雨的持续，在渗流侵蚀作用下围岩内部裂隙数量不断增加并逐渐相互连通，在降雨 9 d 后，左拱肩处出现了明显的优势通道。优势通道的存在，为后续的渗流提供了“捷径”，使得隧道两侧土体颗粒不断向下迁移，引起变质量渗流，进而对土层造成渗流潜蚀破坏。因此，优势通道的形成是个动态变化的过程，强降雨发生时，在渗流侵蚀和自重增加的双重作用下，地表既有裂隙不断延伸扩大并逐渐与深层黄土新发育形成新的裂隙连通，形成集中的优势通道。优势通道是“新”“旧”裂隙共同耦合作用下的结果。在渗流侵蚀作用下，侵蚀空腔不断扩大，导致水迅速渗入深层土层，直至隧道轮廓被浸润锋包围<sup>[16]</sup>。降雨结束后，地表出现许多裂缝，最大宽度可达 1 cm。

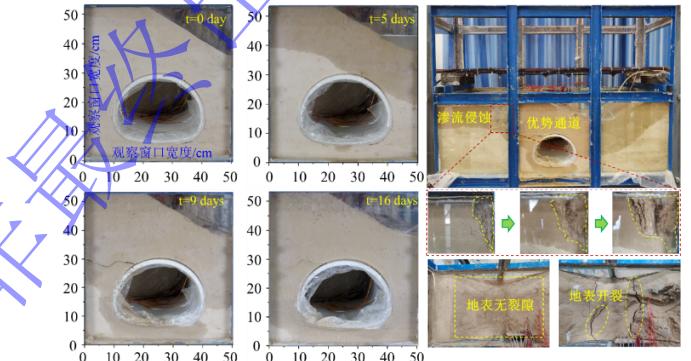


图 7 浸润锋时空分布特征

Fig.7. Spatiotemporal distribution characteristics of the wetting front

降雨入渗过程中各测点处体积含水量的变化如图 8 所示。在降雨的初始阶段，所有监测点的体积含水量保持不变，保持其初始值。随着降雨入渗的进行，浸润锋首先到达监测点 W2，随后该位置的体积含水量迅速增加，4.4 天后稳定在约 42.2%。当浸润锋入渗到右拱肩时，受到隧道衬砌的阻碍，改变了水分的渗流路径。隧道右侧的一部分水开始向隧道左侧迁移，进一步加速了隧道左侧湿润锋的向下运动。经过 4.8 天的降雨，湿润锋同时到达监测点 W3 和 W4。由于左拱肩围岩中存在明显的主导通道，监测点 W3 的体积含水量增加率明显高于 W4。最终，经过 9 天的降雨，监测点 W3 和 W4 的体积含水量分别稳定在 42.3% 和 41.5%。在 8.2 天的降雨量下，当浸润锋到达监测点 W5 时，随着浸润锋后土体饱和度的增加，雨水的渗透速率降低，体积含水量的增加速率显著减缓。14.8 天后，体积含水量稳定在约 41.2%

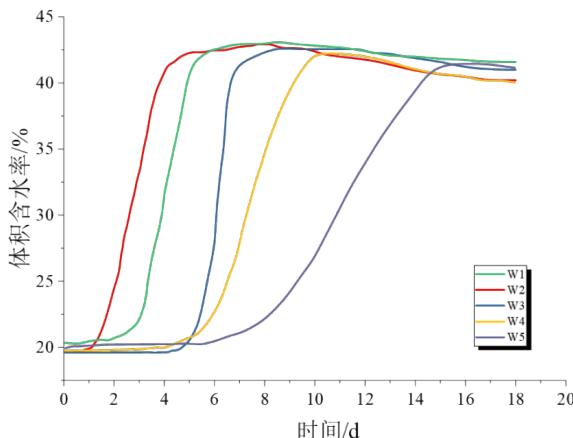


图 8 围岩不同深度体积含水量的变化曲线

Fig8. The variation curves of volume water content at different depths of the surrounding rock.

#### 2.4.2 衬砌接触压力

隧道衬砌接触压力的时程曲线可分为 4 个阶段, 如图 9 所示。降雨初期, 各监测点衬砌接触压力均处于快速增长阶段 (0~2.4 d)。随着降雨的持续, 隧道衬砌接触压力逐渐增大, 但不同监测点的增长幅度不同。在偏压荷载作用下, 拱顶、左拱肩和左拱脚受降雨影响显著。降雨 2.4 d 后, 接触压力分别从 0 kPa 增加到 30.5 kPa、45.1 kPa 和 30.8 kPa。其他位置的接触压力增长速度相对较慢。

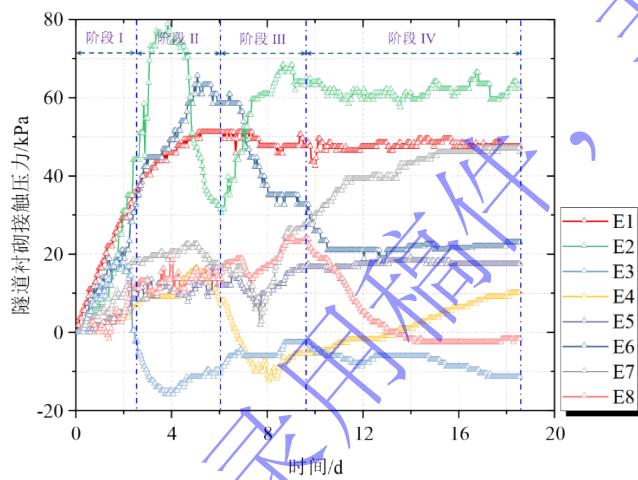


图 9 隧道衬砌接触压力随时间的变化曲线

Fig9. Curve of tunnel lining contact pressure changing with time  
随着雨水的渗入,

E1、E2、E4、E5、E6、E7、E8 监测点隧道衬砌接触压力进入持续增长阶段 (2.4~4.8 d)。与前一阶段相比, 增长速率有所下降。降雨 2.4 d 后, E3 监测点衬砌接触压力由 19.8 kPa 迅速下降至 -17.9 kPa。产生这种现象可能与右拱肩处土压力传感器位于冲沟地形一侧埋深较浅有关。在降雨过程中, 雨水不断汇集到冲沟中, 右拱肩土压力传感器附近的围岩在雨水的侵蚀下发生变形, 形成内部裂隙。此外, 降雨 4 d 后, E2

监测点隧道衬砌接触压力也呈现下降趋势, 由 78.2 kPa 降至 31.5 kPa。随后进入波动不稳定阶段 (4.8~9.6 d)。受优势入渗的影响, E2、E4、E5、E7 监测点的衬砌接触压力呈先减小后增大的波动变化。另一方面, 监测点 E6 显示接触压力持续下降。测点 E3 和 E8 的接触压力受影响较小, 均呈缓慢上升或小幅波动趋势。降雨结束后 (9.6~18 d), 各监测点衬砌接触压力波动较小, 最终趋于稳定。

#### 2.4.3 孔隙水压力

不同监测点孔隙水压力变化如图 10 所示。降雨 2.8 d 后 P1-P8 孔隙水压力波动较小或保持不变。当降雨到第 2.8 d 时, 由于冲沟积水作用, 浸润锋首先到达右拱肩, P3 和 P1 处孔隙水压力迅速增大。当降雨到第 9.6 d 时, P1 和 P3 孔隙水压力分别达到最大值 67.5 kPa 和 76.5 kPa。随着浸润湿锋继续下移, P2 处孔隙水压力也达到最大值 59.5 kPa, 但增幅远小于 P3 处。由于衬砌的存在, 浸润锋的迁移方向和影响范围受到影响, 导致浸润锋沿隧道轮廓线从两侧向隧道底部快速渗透。因此, 在降雨达到 4.8 d 左右时, 隧道仰拱孔隙水压力缓慢增大, 比拱脚和拱腰更早进入快速增长阶段。隧道仰拱最大孔隙水压力达到 103 kPa。随后, 拱脚和拱腰处孔隙水压力也进入快速增长阶段。由于围岩内渗流通道的不断发育和扩大, 降雨停止后各监测点孔隙水压力开始减小, 随后趋于稳定。

与拱肩和拱顶孔隙水压力相比, 仰拱和拱脚处孔隙水压力的下降速度较慢, 所占比例较小, 说明隧道仰拱和拱脚处积水较多。这一现象解释了富水黄土隧道开挖过程中拱脚处普遍存在积水现象, 验证了该试验方法的可行性和有效性。

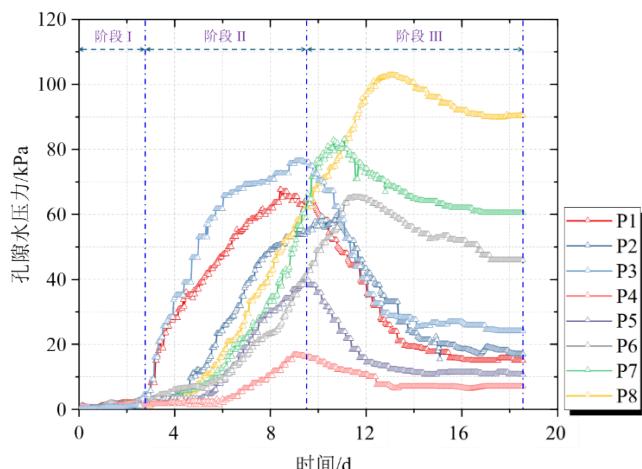


图 10 孔隙水压力随时间变化曲线

Fig10. Curve of pore water pressure changing with time  
2.4.4 衬砌结构内力

随着降雨量的增加,衬砌各测点轴向力均呈增大趋势,且均为负值,说明在降雨入渗下,隧道衬砌主要承受压应力(图11a)。左拱肩轴向力的增加最大,并在降雨2.4 d时出现显著的增加。降雨结束时,左拱肩轴力达到32.3 kN。其次是左拱脚(24.7 kN)和右拱脚(18.8 kN)。其他测点轴向力增长幅度较小,无明显阶跃波动。降雨结束后,右拱肩、左拱腰、右拱腰、拱顶、仰拱处各监测点轴向力增量分别达到9.7 kN、31.4 kN、5.2 kN、17.2 kN、15.9 kN后趋于稳定。另外,从隧道轴向力分布图(图11b)可以看出,最大压力出现在左拱肩处,隧道左侧轴向力一般大于右侧。因此,在偏压作用下浅埋黄土隧道发生强降雨入渗时,对隧道的影响主要集中在偏压侧。

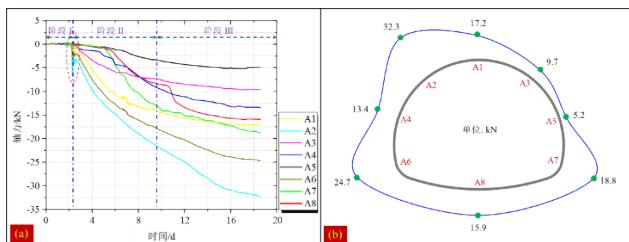


图11 隧道衬砌轴力随时间变化曲线及衬砌轴力分布特征

Fig11. Curve of tunnel lining axial force changing with time and distribution of tunnel lining axial force

降雨入渗引起的轴向力的不均匀变化也会导致衬砌结构整体弯矩的重新分布,如图12所示。与隧道轴向力变化曲线相似,降雨前期各测点弯矩变化不明显。在此过程中,雨水只渗入表层土体,对隧道结构影响较小。当降雨2.8 d后,各测点弯矩值逐渐增大,左拱腰、左拱脚、右拱脚均呈现负增长趋势,表明衬砌向隧道内轮廓弯曲。其余测点呈正增加趋势,表明衬砌向围岩侧弯曲。降雨结束后,隧道衬砌各测点弯矩值趋于稳定。最大负弯矩出现在左拱脚(B6)处,为-23.5 kN·m。最大正弯矩出现在左拱肩(B2)处,为23.4 kN·m。受偏压影响,降雨结束后隧道各监测点应力分布不均匀,左侧最大弯矩为右侧的1.5倍左右。

(B6)处,为-23.5 kN·m。最大正弯矩出现在左拱肩(B2)处,为23.4 kN·m。受偏压影响,降雨结束后隧道各监测点应力分布不均匀,左侧最大弯矩为右侧的1.5倍左右。

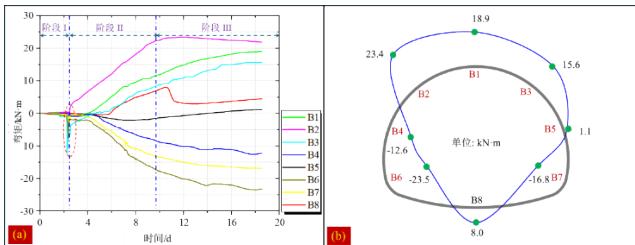


图12 隧道衬砌弯矩随时间变化曲线及衬砌弯矩分布特征

Fig12. Curve of tunnel lining bending moment changing with time and distribution of tunnel lining bending moment

### 3 裂隙与降雨耦合作用下黄土隧道变形数值模拟研究

模型试验表明,降雨过程中形成的优势通道不仅改变了水分迁移路径,而且导致围岩出现潜蚀空洞。水分沿着优势渗流通道可入渗至深部围岩,为黄土隧道围岩失稳破坏提供了条件。然而隧道的失稳破坏并非在短时间内发生,在裂隙发育过程中,不同阶段下的裂隙深度对围岩水分迁移和隧道稳定性的影响是不同的。因此,在上述模型试验的基础上,采用COMSOL Multiphysics软件模拟分析不同裂隙深度与降雨耦合作用下的黄土隧道围岩优势入渗特征及隧道结构响应规律,进一步揭示降雨优势入渗作用下浅埋偏压黄土隧道变形破坏机理。

#### 3.1 模型建立与参数选取

在浅埋偏压段,地层中原有垂直节理裂隙的发育程度较大,由偏压引起的沿斜坡向下的横向位移也更容易产生施工地表裂缝。此外,降雨期间雨水不断向冲沟汇集,隧道右侧围岩在雨水侵蚀下发生变形,导致内部裂隙进一步扩张。因此,根据隧道实际工况,建立长100 m、高47 m的二维模型(图13),并在隧道右拱肩处设置不同的裂隙深度。

模型采用孔隙-裂隙双通道渗流模型<sup>[17]</sup>,模拟裂隙不同发育阶段的降雨入渗情况。含裂隙土的降雨入渗边界模拟的关键点是流量边界和压力边界的处理,本次入渗边界采用地表压力控制的混合入渗边界条件(式(1))<sup>[13]</sup>。

$$-n \cdot \rho u = c_1 \rho R + c_2 \rho \frac{K_s}{L} \left( H_w - \frac{p}{\rho g} \right) \quad (1)$$

式中:  $R$  为降雨强度,  $\rho$  为流体密度,  $K_s$  为饱和渗透系数,  $H_w$  为积水深度,  $p$  为入渗边界下表面的孔隙水压力。当  $p < 0$  时,  $c_1=1$ ,  $c_2=0$ ;  $p > 0$  时,  $c_1=0$ ,  $c_2=1$ 。

土层按理想弹塑性材料处理,遵循M-C(莫尔-库仑)屈服准则进行计算,基质的非饱和水力参数由Van-Genuchten (VG) 方程(式(2))确定,裂隙的非饱和水力参数由Brooks-Corey (BC) 方程(式(3))确定。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha H_p|^n)^m} \quad (2)$$

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{|\alpha H_p|^n} \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

式中:  $H_p$  为压力水头,  $\alpha$ 、 $n$  和  $m$  均为模型拟合

参数, 且  $m=1-1/n$ ,  $\theta$  为体积含水率,  $\theta_s$  和  $\theta_r$  分别为饱和含水率及残余含水率,  $S_e$  为有效饱和度。

表 3 土层物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	含水率	孔隙率	弹性模量/(MPa)	黏聚力/(kPa)	内摩擦角/(°)
粉质粘土	2.06	21.2	0.37	8.5	28	25

表 4 土层非饱和水力参数

Table 4 Unsaturated hydraulic parameters of soil layers

土层	饱和渗透系数 $k_s$ /(m·s <sup>-1</sup> )	持水模型参数 $\alpha$ /(m <sup>-1</sup> )	持水模型参数 $n$
基质	$2.1 \times 10^{-5}$	0.13 (V-G 模型)	2 (V-G 模型)
裂隙	$4.3 \times 10^{-4}$	2.9 (B-C 模型)	0.15 (B-C 模型)

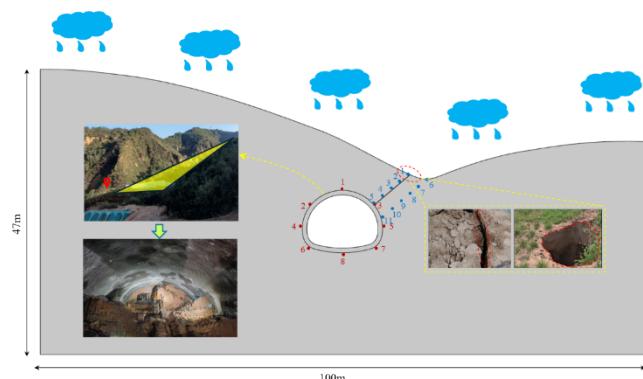


图 13 数值模拟二维模型

Fig.13 Numerical simulation two-dimensional model

通过开展非饱和黄土室内试验 (图 14) 获取土层物理力学参数及非饱和水力参数, 裂隙处 Brooks-Corey 拟合参数  $\alpha$ ,  $n$ ,  $l$  参考 Zhou 等<sup>[18-20]</sup>研究成果选取。各土层物理力学参数及非饱和水力参数见表 3 和表 4。初始条件模型侧边界和底部边界设置为不透水边界 (式 (5)), 初始地下水位设置为  $H=15$  m (式 (6))。降雨强度为 80 mm/h 的暴雨工况, 持续 10 d。

$$-n \cdot \rho u = 0 \quad (5)$$

$$p = 9800 \cdot (15 - y) \quad (6)$$

式中:  $n$  为边界的外法线向量,  $\rho$  为流体密度,  $u$  为模型位移场的  $x$  分量,  $y$  为模型高度。

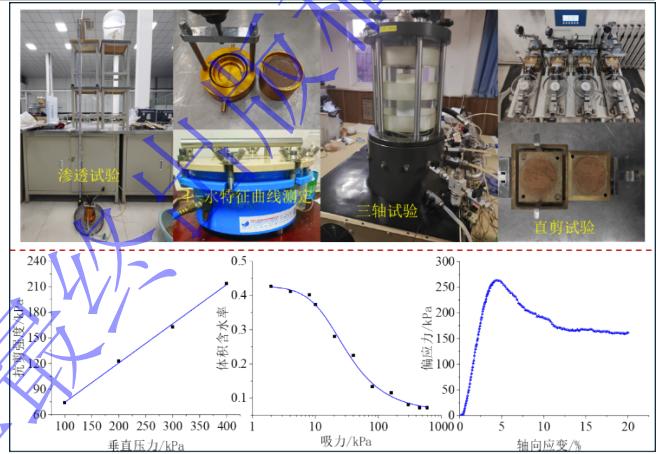


图 14 原状土室内试验及相应结果

Fig.14. Indoor testing of undisturbed soil and corresponding results

表 5 模拟计算工况

Table 5 Simulation of working conditions

工况	裂隙深度 L/(m)	裂隙宽度 d_f/(m)
1	0	-
2	3	0.1
3	6	0.15
4	贯通	0.2

考虑裂隙发育阶段, 模拟工况见表 5。采用 COMSOL Multiphysics 软件探针功能中的域点探针在裂隙下方每 2 m 设置 1 个监测点, 共 5 个; 在裂隙旁设置 6 个监测点; 在隧道拱顶、拱肩、拱腰、拱脚和拱底各布设 1 个监测点, 共 8 个, 以达到在模型计算过程中实时记录该位置处的所有数据。监测点布置如图 13 所示。

### 3.2 数值模拟可靠性验证

为了验证数值模拟分析结果的准确性, 在模拟分析不同裂隙深度与降雨耦合作用下的黄土隧道围岩优势入渗特征及隧道结构响应规律之前, 通过建立本次模型试验工况对数值模拟结果的可靠性进行验证。由

于模型试验过程中左侧出现了明显的优势通道，改变了水分迁移路径，对水分的入渗速度、入渗范围以及速度结构受力影响较大，然而从目前数值模拟研究成果来方面看，如何准确的实现降雨过程诱发优势通道的发育演化过程仍然是一个挑战。因此，本次选取模型试验过程中隧道右侧体积含水率测点2试验结果进行验证。由图15可以看出，数值模拟的体积含水率增长速度略大于模型试验的结果，试验值与模拟值相差在10%以内，分析其原因可能是模型试验填土压实过程中压实度不均匀导致，但最终达到饱和的时间是基本相同，对于围岩这种应力复杂的工程结构来说，已满足工程应用的要求，因此可以证明本次数值模拟分析的结果是合理的、可靠的。

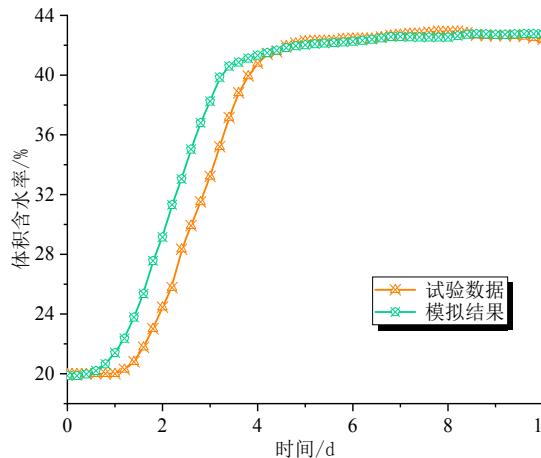


图15 W<sub>2</sub>测点模拟结果与试验数据对比

Fig.15. Comparison between W<sub>2</sub> measurement point simulation

results and experimental data

### 3.3 优势入渗作用下黄土隧道的影响分析

#### 3.3.1 入渗特征分析

裂隙的存在会改变围岩的水分迁移模式。当地表裂隙未发育时，降雨之后发生均匀入渗，浸润锋逐渐下移，浸润锋形态与地平面相似，呈现“曲线型”。然而，由于围岩渗透系数较小，当降雨10 d后，浸润锋到达最大深处仅为地表以下7.5 m处（图16a）。当地表出现裂隙时，由于裂隙处渗透系数较大，储水能力较差，雨水可沿裂隙达到隧道埋深位置处（图16b）。持续的强降雨使得水分沿裂隙向两侧围岩不断扩散，并且当水分达到裂隙末端后，裂隙内的优势流作为水源不断向无裂隙区域的围岩扩散，逐渐转变为无裂隙区域的基质流。无裂隙区域围岩也在基质流和优势流共同作用下快速达到饱和状态，浸润锋形态也逐渐由“曲线型”变为“漏斗型”。并且随裂隙深度的增加，渗流影响范围也逐渐增大（图16c），雨水到达深部围岩的时间也越来越短。

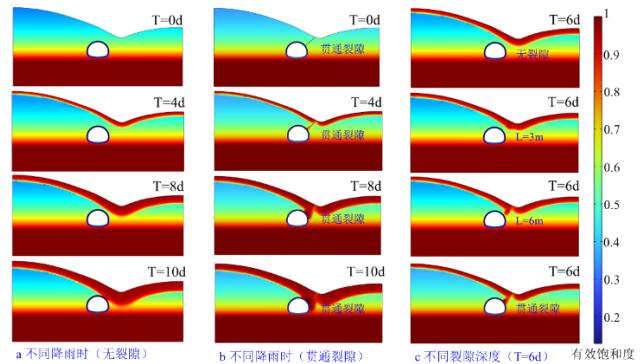


图16 有效饱和度云图

Fig.16 Effective saturation cloud map

裂隙处监测点有效饱和度随时间变化曲线如图17所示。由图17可知，地表无裂隙时，即使长时间降雨雨水也很难渗透到隧道埋深位置，当降雨9 d时雨水渗到右拱肩附近处的土体。裂隙深度3 m时，除地表外各测点前期饱和速度均有所提高，并且在降雨持续8 d时右拱肩处土体开始趋于饱和。随着裂隙深度的进一步增大，当裂隙深度达到6 m时，裂隙的存在不仅加快了水分的下渗，更改变了水分的运移路径，与前三个工况相比，裂隙末端处土体更早出现局部暂饱和区，并且在降雨持续5 d时右拱肩处土体开始趋于饱和。当出现贯通裂隙时，优势入渗影响更加明显，只需要降雨持续2 d，右拱肩处的围岩便开始趋于饱和。各监测点的饱和顺序为：无裂隙处浅层围岩、裂隙末端、裂隙下部、裂隙上部围岩。因此，裂隙深度严重影响到围岩的水分入渗，特别是当出现贯通裂隙时，短时强降雨就可能会引发隧道结构破坏。

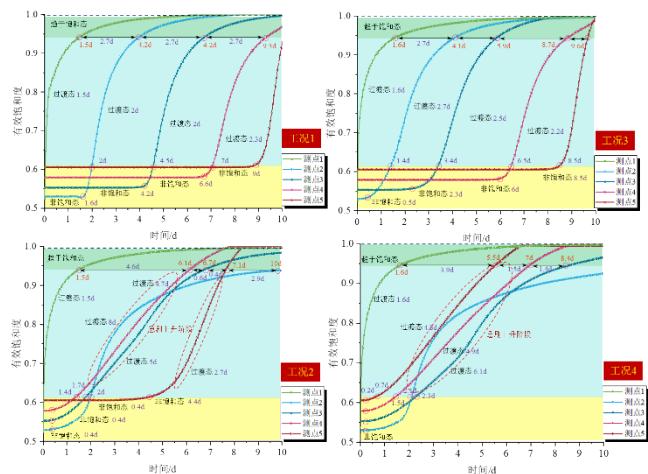


图17 裂隙处监测点有效饱和度随时间变化曲线

Fig.17 Curve of effective saturation of monitoring points changing with time

#### 3.3.2 入渗速率分析

不同工况下裂隙处各测点的入渗速率随时间的变化如图18所示。当裂隙尚未发育时，入渗率受围岩渗透系数的制约。当降雨7、9 d时，浸润锋依次到

达6、8 m深度,此时各监测点处入渗率曲线表现为先“凹”后“凸”的增长趋势。在裂隙发育初期,受地表孔隙渗流与裂隙优势流入渗的共同影响,地表土体迅速饱和。此外,由于优势流入渗影响范围有限,测点1、2受影响较大,入渗速率较早的进入上升阶段,而对于其余测点则影响较小。随着裂隙的发育扩张,总入渗量显著提升,优势渗流的影响深度进一步增加。此时降雨除了发生基质入渗,还会沿着裂隙发生裂隙优势入渗。因此,除了地表监测点外,裂隙尖端附近的监测点入渗速率率先增大,响应时间早于浅层围岩监测点。当降雨沿裂隙到达裂隙尖端时,裂隙尖端存在明显的水力梯度,水分自裂隙尖端向四周扩散,入渗模式也由均匀入渗逐渐转变为裂隙控制的优势流入渗,入渗速率曲线从先“凹”后“凸”型增长变为“凹”型增长,更加有利于水分在围岩中扩散。

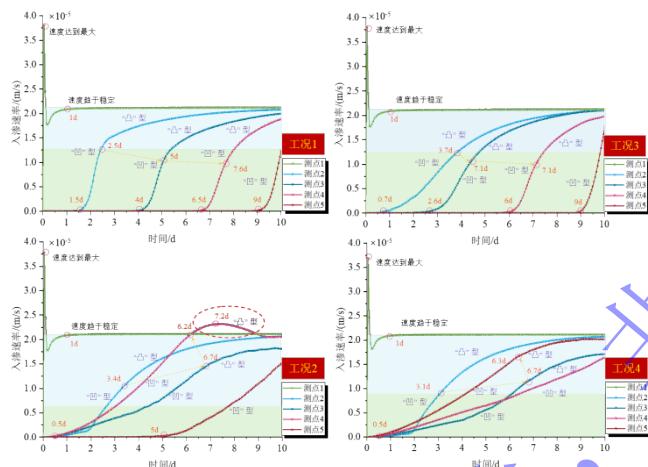


图18 裂隙处监测点入渗速率随时间变化曲线

Fig.18 Curve of infiltration rate of monitoring points changing with time

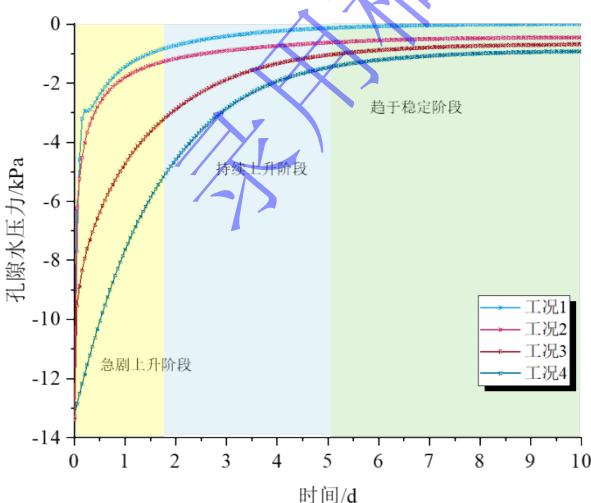


图19 不同工况下裂隙处地表孔隙水压力随时间变化曲线  
Fig.19 Curve of surface pore water pressure of monitoring points changing with time in different working conditions

针对上述现象,对不同工况下裂隙处地表孔隙水压力进行分析。由图19可以看出,在没有裂隙的情况下,降雨前1.7 d内孔隙水压力呈现出“直线”式急剧增加,1.7 d到5 d之间孔隙水压力持续上升,但增长速率有所减小,最终在第5 d后趋于稳定(0 kPa)。这表明降雨一定时间后大部分降雨随地表径流而流走,入渗边界为压力边界。当裂隙出现并逐步扩张时,由于裂隙的存在,提升了土体的透水性。因此,随着裂隙深度增加地表压力在降雨开始后增长速率不断变缓,稳定值均低于0 kPa,此时降雨量小于裂隙土的入渗能力,入渗边界变为流量边界。

为进一步探究优势入渗对裂隙周围土体水分迁移的影响,选取工况4裂隙旁6个点作为研究对象。如图20所示,裂隙的存在对地表土体测点的入渗速率影响不大。降雨初期,测点6、7入渗速率与入渗曲线形状较没有裂隙时相差不大,但入渗速度有所减小。当降雨4 d时,测点8、9处的入渗速率开始呈“凹”型增大,与没有裂隙时增长曲线相差较大。因此,优势通道的出现不仅会加快水分渗入深部围岩,而且会改变深部土体的水分迁移路径。

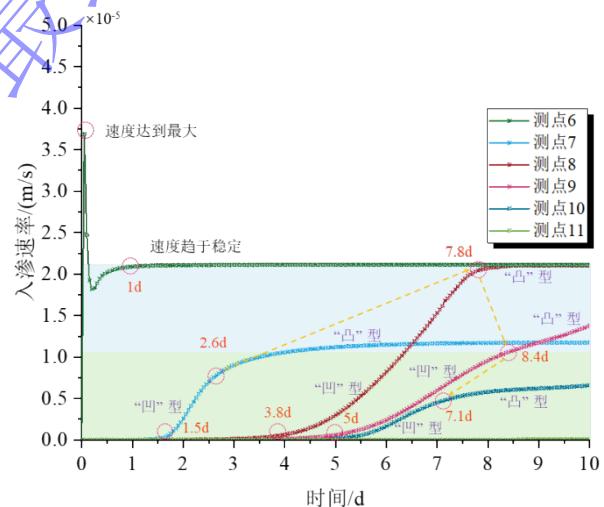


图20 裂隙旁监测点入渗速率随时间变化曲线

Fig.20 Curve of effective saturation of monitoring points changing with time

### 3.3.3 隧道变形及结构受力分析

4种工况隧道拱顶变形情况如图21所示。在强降雨作用下,无裂隙发育时围岩发生均匀入渗,隧道拱顶沉降最大值可达24.1 mm。而随着裂隙的出现与发育,改变了水分的迁移路径,更多雨水入渗至深部围岩,加剧了围岩变形破坏速度。当裂隙长度为3 m时,隧道拱顶沉降最大值为31.2 mm;而当裂隙贯通时,隧道拱顶沉降最大值为56.3 mm。由此看出,裂隙深度和裂隙宽度的增大会显著加剧隧道变形。为进一步分析裂隙优势入渗对隧道变形的影响,选取拱顶

旁另外两测点绘制位移-时间曲线进行分析。可以看出,降雨前5 d,隧道拱顶及左侧围岩沉降占据主导地位,随着降雨的持续,隧道拱顶右侧围岩沉降速率逐渐增大并占据主导地位。分析产生上述现象首先是由于地形引起的,在偏压荷载和降雨入渗耦合作用下,隧道左侧所承受的围岩压力要远大于右侧,因此降雨初期隧道左侧拱顶沉降占据主导地位。而随着降雨的持续,冲沟附近雨水不断积聚,在裂隙优势入渗作用下,雨水能够更早更快的入渗至隧道埋深处,并且在裂隙末端形成局部暂饱和区,使得隧道拱顶右侧附近围岩抗剪强度降低、有效应力减小,最终导致降雨中后期隧道右侧拱顶沉降占据主导地位。

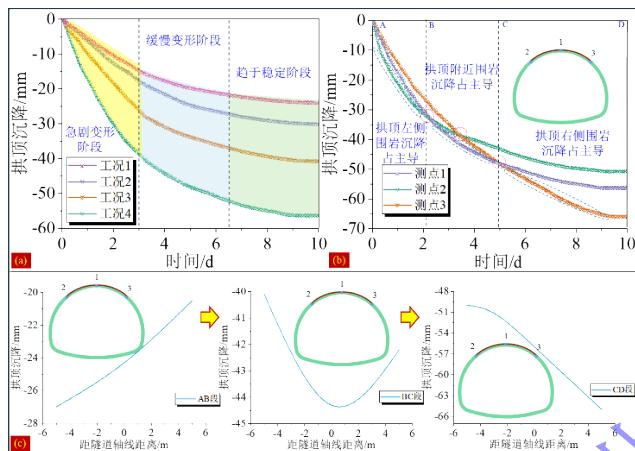


图 21 隧道拱顶沉降随时间变化曲线

Fig.21 Curve of tunnel arch settlement changing with time

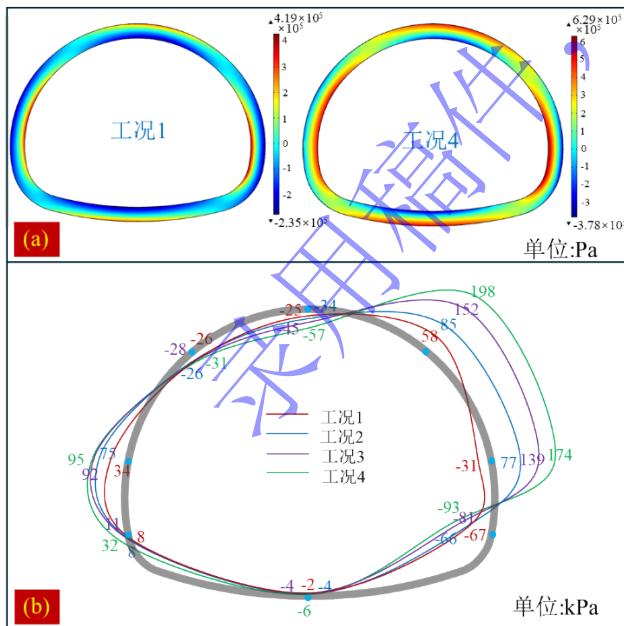


图 22 不同工况下隧道衬砌支护结构应力变化

Fig.22 Stress variation of tunnel lining support structure

图 22a 为不同工况下隧道衬砌支护结构应力变化云图,红色区域表示承受拉应力,蓝色区域表示承受压应力。各工况下隧道结构受力模式表现为:拱顶、

拱底外部承受拉应力,内部承受压应力;拱腰、拱脚外部承受压应力,内部承受拉应力。此外,在偏压荷载影响下,左拱肩外侧承受压应力,右拱肩外侧承受拉应力。当没有裂隙时,隧道受力较为稳定,最大拉应力 4.19 MPa,最大压应力为 2.35 MPa。随着裂隙深度的增加,隧道结构受力变得不稳定,其中优势运移通道下侧隧道结构所受影响最为突出,主要体现在右拱肩和拱腰处。特别是当出现贯通裂隙时,裂隙优势入渗所引起右拱肩处应力增值相较于均匀入渗增大 140 kPa,右拱腰处应力状态由压应力转变为拉应力,应力增值相较于均匀入渗增大 174 kPa (图 22b),对隧道的稳定性造成了严重威胁。降雨结束后支护结构最大拉应力达到 6.29 MPa,最大压应力可达 3.78 MPa。

#### 4 裂隙优势入渗诱发隧道变形破坏机理

根据模型试验与数值模拟分析结果将裂隙优势入渗作用下隧道变形破坏演化机制分为孕育阶段、优势通道发育阶段和变形破坏阶段 (图 23)。

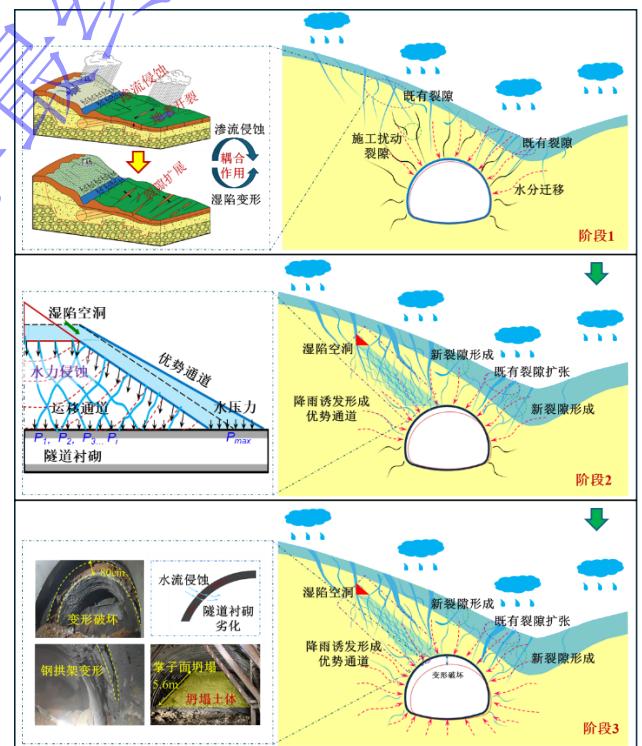


图 23 降雨优势作用下浅埋偏压黄土隧道变形破坏演化过程

Fig.23 Deformation and failure evolution process of shallow buried bias loess tunnel induced by fracture dominant infiltration

**孕育阶段:** 由于黄土垂直节理发育,入渗能力较强,降雨初期的入渗流速等于降雨强度,入渗边界为流量边界。随着强降雨的持续,地表土层中的裂隙逐渐被水分填满闭合,地表土层达到饱和状态。此时降雨难以入渗至深部围岩,浸润锋较浅,对隧道结构稳定性影响较小。

优势通道发育阶段：降雨中期在渗流侵蚀和自重增加的双重作用下，地表既有裂隙不断延伸扩大并逐渐与深层黄土新发育形成的裂隙连通，形成集中的优势通道<sup>[16]</sup>。在优势运移通道发展过程中，通道中紊流产生的旋涡运动及对土颗粒的推移作用，不断将土体颗粒分散和游离成泥沙，引发变质量入渗。旋涡运动产生的下蚀与侧蚀现象使得通道不断扩大，最终在围岩中形成复杂的潜在运移通道网络，使得浸润锋进一步下移。优势通道的形成改变了水的迁移路径，使得水分可迅速渗入深部围岩，为黄土隧道围岩失稳破坏提供了条件。

变形破坏阶段：随着入渗深度和入渗量的增大，围岩基本处于饱和状态，围岩强度降低，隧道变形显著增加。在优势通道影响下，入渗模式从稳态入渗逐渐转变为非稳态的优势入渗，作用到衬砌上使得部分结构内力出现明显的阶跃增幅，其中优势运移通道下侧隧道结构所受影响最为突出。当隧道支护结构承载力不足以抵抗围岩压力时，隧道会发生严重的变形破坏，甚至塌方。

## 5 结论

(1) 在渗流侵蚀和自重增加的双重作用下，地表既有裂隙不断延伸扩大并逐渐与深层黄土垂直节理裂隙重新发育形成新的裂隙连通，形成集中的优势通道。优势通道的出现不仅会加快水分渗入深部围岩，而且会改变深部土体的水分迁移路径。在优势通道影响下，入渗模式从稳态入渗逐渐转变为裂隙控制的优势流入渗。

(2) 优势入渗的出现使得入渗率曲线从先“凹”后“凸”型增长变为“凹”型增长，加速了无裂隙处围岩的饱和过程。随着裂隙深度的增加，渗流影响范围越来越大，浸润锋形态逐渐由“曲线型”变为“漏斗型”，雨水到达隧道埋深的时间也越来越短。

(3) 在裂隙优势入渗作用下，隧道受力表现出明显的不对称性，其中优势运移通道下侧隧道结构所受影响最为突出。裂隙末端形成局部暂饱和区使得优势运移通道下侧附近围岩抗剪强度降低、有效应力减小，导致偏压侧隧道变形呈“向内凹”趋势，非偏压侧隧道变形呈“向外凸”趋势。当出现贯通裂隙时，优势入渗所引起的隧道拱顶沉降达到 56.3 mm，结构应力增值相较于均匀入渗增大 140 kPa。降雨入渗下黄土隧道变形破坏演化机制可分为孕育阶段、优势通道发育阶段和变形破坏阶段。

## 参考文献：

- [1] 孙萍萍,张茂省,程秀娟,等.黄土高原地质灾害发生规律[J].山地学报,2019,37(05):737-746.  
(Sun Ping-ping, Zhang Mao-sheng, Cheng Xiu-juan, et al. The occurrence patterns of geological hazards on the loess plateau[J]. Mountain Research, 2019, 37(05): 737-746.(in Chinese))
- [2] 张茂省,胡炜,孙萍萍,等.黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望[J].地球环境学报,2016,7(04):323-334.  
(Zhang Mao-sheng, Hu Wei, Sun Ping-ping, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides [J]. Journal of Earth Environment, 2016, 7(04): 323-334. (in Chinese))
- [3] 孙恒飞,朱兴华,成玉祥,等.黄土优势渗流研究进展与展望[J].自然灾害学报,2021,30(06):1-12.  
(Sun Heng-fei, Zhu Xing-hua, Cheng Yu-xiang, et al. Research progress and prospect of preferential seepage in loess [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(06): 1-12. (in Chinese))
- [4] 邱军领,秦伟文,赖金星,等.突发高压渗流作用下黄土地铁隧道水压阶跃效应分析[J].岩土工程学报,2023,45(04):758-767.  
(Qiu Jun-ling, Qin Yi-wen, Lai Jin-xing, et al. Study on step effect of hydraulic pressure of loess metro tunnel under sudden high-pressure seepage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1-10 [2024-08-12]. (in Chinese))
- [5] 唐K J, 刘D D, 谢S H, et al. Analysis of loess water migration regularity and failure response of tunnel structure under rainfall environment[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(6), 251.
- [6] 赵宽耀,许强,刘方洲,等.黄土中优势通道渗流特征研究[J].岩土工程学报,2020,42(05):941-950.  
(Zhao Kuan-yao, Xu Qiang, Liu Fang-zhou, et al. Seepage characteristics of preferential flow in loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(05): 941-950. (in Chinese))
- [7] Qin Yi-wen, Qiu Jun-ling, Lai Jin-xing, et al. Seepage characteristics in loess strata subjected to single point water supply[J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127611.
- [8] 付敬,艾凯,施华堂,等.裂隙及强降雨入渗对堆积体滑坡渗流场及稳定性的影响[J].长江科学院院报,2023,40(09):112-117.  
(Fu Jing, Ai Kai, Shi Hua-tang, et al. Influence of fracture and heavy rainfall infiltration on seepage field and stability of accumulation landslide [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(09): 112-117. (in Chinese))
- [9] 张永双,吴瑞安,任三绍.降雨优势入渗通道对古滑坡复活的

影响[J].岩石力学与工程学报,2021,40(04):777-789.  
(Zhang Yong-shuang, Wu Rui-an, Ren San-shao. Influence of rainfall preponderance infiltration path on reactivation of ancient landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(04): 777-789. (in Chinese))

[10] Kukemilks, Karlis, Jean-Frank Wagner, Tomas Saks, and Philip Brunner. Physically based hydrogeological and slope stability modeling of the turaida castle mound[J]. Landslides, 2018, 15(11):2267-2278.

[11] 黄晓虎,魏兆亨,易武,等.裂隙优势流入渗诱发堆积层滑坡浅层破坏机理研究[J].岩土工程学报,2024,46(06):1136-1145.  
(Huang Xiao-hu, Wei Zhao-heng, Yi Wu, et al. Mechanism of fracture preferential flow infiltration-induced shallow damage of colluvial landslides [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(06): 1136-1145. (in Chinese))

[12] 张昭,祝良玉,李光耀,等.表征雨水在土体裂隙内优势入渗过程的解析模型[J].岩土工程学报,2023,45(09):1831-1840.  
(Zhang Zhao, Zhu Liang-yu, Li Guang-yao, et al. Analytical model for preferential infiltration into cracks in soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(09): 1831-1840. (in Chinese))

[13] 邱军领,贾玎,赖金星,等.含裂隙土质隧道降雨入渗双通道渗流模型[J/OL].岩土工程学报,1-10[2024-08-12].  
(Qiu Jun-ling, Jia Ding, Lai Jin-xing, et al. Dual channel seepage model of cracked soil tunnels under rainfall infiltration [J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1-10 [2024-08-12]. (in Chinese))

[14] Qiu Jun-ling, Liu De-di, Zhao Kai, et al. Influence spatial behavior of surface cracks and prospects for prevention methods in shallow loess tunnels in China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 143 (2024): 105453.

[15] 张延杰.人工制备湿陷性黄土工程性质与深基础竖向承载力计算方法研究[D].兰州交通大学,2017.  
(Zhang Yan-jie. Research on Engineering Properties of Artificial Prepared Collapsible Loess and Calculation Method of Vertical Bearing Capacity of Deep Foundation [D]. Lanzhou Jiaotong University, 2017. (in Chinese))

[16] Tang K J, Qiu J L, Lai J X, et al. Experimental investigation on deformation-failure mechanisms of a shallow-bias large-section loess tunnel induced by rainfall[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 157: 106253.

[17] 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.  
(Hou Xiao-ping, Fan Heng-hui. Study on rainfall infiltration characteristics of unsaturated fractured soil based on COMSOL Multiphysics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(02): 563-572. (in Chinese))

[18] Shao W, Bogaard T A, Bakker M, et al. Quantification of the influence of preferential flow on slope stability using a numerical modelling approach[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(5), 2197-2212.

[19] Zhou C M, Shao W, Van Westen C J. Comparing two methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles for a landslide in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Engineering Geology, 2014, 173: 41-53.

[20] Shao w, Yang Z J, Ni J J, et al. Comparison of single- and dual-permeability models in simulating the unsaturated hydromechanical behavior in a rainfall-triggered landslide[J]. Landslides, 2018, 15: 2449-2464.