

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210429001

文章编号: 1674-599X(2023)01-0059-09

# 降雨条件下隧道与堆积层边坡相互作用机理研究

程鑫<sup>1,2</sup>, 张永杰<sup>1</sup>, 罗志敏<sup>1</sup>, 叶钰梁<sup>1</sup>, 李佑军<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省碧桂园地产有限公司, 湖南 长沙 410000)

**摘要:** 堆积层边坡具有结构松散、渗透性强和易受施工扰动等特点。隧道开挖与降雨入渗均可导致堆积层坡体产生挤压变形, 使隧道支护结构因围岩压力增加发生变形和开裂, 影响其安全。本研究以湖南省某山岭隧道工程为背景, 采用有限元数值方法, 分析在不同工况下堆积层边坡与平行穿越隧道之间的相互作用和堆积层坡体的变形机理, 探讨在降雨入渗条件下, 隧道穿越堆积层边坡时, 隧道支护结构和堆积层坡体受力变形的时空变化特征。研究表明: 降雨入渗使堆积层坡体及平行坡向穿越坡体的隧道衬砌结构的应力和变形增大。其中, 堆积层坡体前缘和坡面位置受施工扰动和降雨入渗作用的影响最明显, 位于堆积层内部的隧道衬砌结构拱顶处的受力变形比其拱腰处的受力变形更大, 降雨强度的增大会显著提高该影响效应, 且降雨诱发的隧道拱顶位移变形具有一定的时间滞后性。

**关键词:** 堆积层边坡; 邻近隧道; 降雨; 开挖扰动; 数值分析

中图分类号: U451<sup>1</sup>.4

文献标志码: A

## Research on deformation mechanism of tunnel crossing slope interaction under rainfall conditions

CHENG Xin<sup>1,2</sup>, ZHANG Yongjie<sup>1</sup>, LUO Zhimin<sup>1</sup>, YE Yuliang<sup>1</sup>, LI Youjun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

2. Hunan Country Garden Real Estate Co., Ltd., Changsha 410000, China)

**Abstract:** Accumulation layer slope has the characteristics of loose structure, strong permeability and easy to be disturbed by construction. Tunnel excavation and rainfall infiltration can lead to the extrusion deformation of the accumulation layer slope body, which causes the deformation or cracking of the tunnel support structure due to the increase of surrounding rock pressure and affects its safety. In this paper, a mountain tunnel in Hunan Province was used as a case study, and the interaction deformation mechanism of the deposit slope and the parallel tunnel under different working conditions was analyzed by numerical method, and the temporal and spatial variation characteristics of the force deformation of the tunnel support structure and the deposit slope were discussed when the tunnel crossed the deposit slope under rainfall infiltration. The calculation results show that rainfall infiltration increases the stress and deformation of the slope and the lining structure of the adjacent parallel tunnel. Moreover, the impact of construction disturbance and rainfall infiltration is most significant at the front edge and slope position of the accumulation layer slope. The stress deformation at the vault of the tunnel lining structure located inside the accumulation layer is larger than that at the arch waist, and the increase in rainfall intensity can significantly enhance this effect. Additionally, rainfall-induced settlement deformation of the tunnel arch crown has a certain time lag.

**Key words:** accumulation body slope; adjacent tunnel; excavation disturbance; rainfall; numerical analysis

收稿日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878071)

作者简介: 程鑫(1995—), 女, 长沙理工大学硕士研究生。

近年来,中国西部交通基础设施建设迅猛发展,大量山岭隧道工程随之出现。中国西部山区地形复杂,沟壑纵横,一些山体的表层广泛覆盖着深厚的松散堆积层。部分山岭隧道的进出口将不可避免地穿越此类坡体。在施工或降雨过程中,松散堆积层边坡的稳定性成为影响工程建设安全的关键问题之一。因此,研究在降雨条件下隧道与堆积层边坡的相互作用机理有着重要的实际意义。

松散堆积体为砾石和黏土混合物,是一种介于岩石和土体之间的具有过渡性质的特殊地质体<sup>[1]</sup>,其具有结构松散、渗透性强和易受施工扰动等特点。胡伟等<sup>[2-3]</sup>通过室内试验发现松散堆积体具有离散性大、颗粒级配不连续的特点。左自波<sup>[4]</sup>采用模型试验与数值分析的方法发现了松散堆积体的颗粒级配、坡度和降雨特性等因素对边坡稳定性的影响规律。张书华等<sup>[5]</sup>研究了降雨条件下边坡压力水头的演化规律。谢琳等<sup>[6-7]</sup>采用有限元方法,分析了在不同降雨条件下堆积体边坡的稳定性,得到了降雨强度、降雨历时对边坡安全系数和坡体变形量的影响规律。马泉宇等<sup>[8-10]</sup>通过数值分析,发现了当隧道穿越堆积体时地层位移主要发生在施工部位附近和拱顶下沉明显这两个值得注意的工程现象。李侑军等<sup>[11-12]</sup>基于现场勘测资料,采用数值方法,分析了堆积体边坡与邻近隧道的开挖特性,得到了开挖过程中坡体与隧道支护结构受力和变形的影响规律。这些研究均着重于分析降雨或隧道开挖对堆积层边坡的影响规律,但两者共同作用下堆积层边坡的变形分析及两者对隧道支护结构影响分析的研究鲜见。

因此,本研究将基于实际工程案例,采用有限元数值分析方法,对降雨影响下隧道与堆积层边坡的相互作用机理进行研究,探讨在不同降雨工况下,当隧道平行穿越堆积层边坡时,隧道支护结构和堆积层坡体内力变形的时空演化规律,以期为类似工程的稳定性评价与优化设计提供借鉴。

### 1 工程概况

本研究依托湖南省张家界市某高速公路的山岭隧道工程。该隧道为分离式隧道,修建于堆积层边坡中部,属于邻近隧道平行穿越堆积层边坡的类型,如图1所示。由于隧道的对称性,本研究仅对该隧道右侧进行分析。

该隧道洞口段堆积层区域的岩土体包括山坡面的种植土、粉质黏土、破碎砂质页岩等,其结构松散、渗透性强,岩质较软弱,开挖时易产生坍塌和大变形,围岩划分为V级。基岩区域主要由中风化砂质页岩和微风化砂质页岩构成,施工扰动将对其稳定性造成一定的威胁。其中,中风化砂质页岩是IV级围岩区域的主要岩土体,微风化页岩是III级围岩区域的主要岩土体。

该隧道工程所在地区的气候为亚热带季风湿润气候,四季分明,冬冷期短,夏热期长,雨量充沛,植物生长期长。工程沿线水系发育,且不同季节的水量、水位变化均较大。其局部范围内分布着冲洪积碎石层,该碎石层富含孔隙潜水,形成了相对富水区域。基岩中所含裂隙水的水量较小,但基岩破碎带、断层的储水量较为丰富。地下水由大气降水补给,大多流向冲沟等地势低洼处。

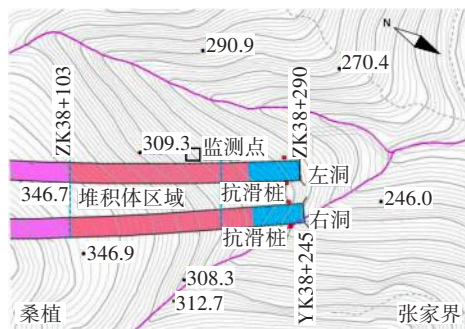
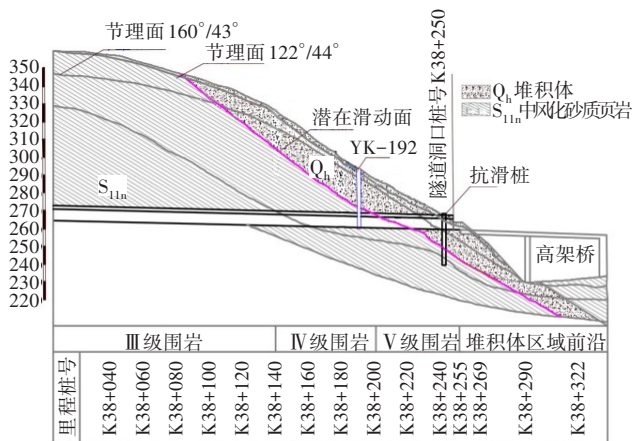


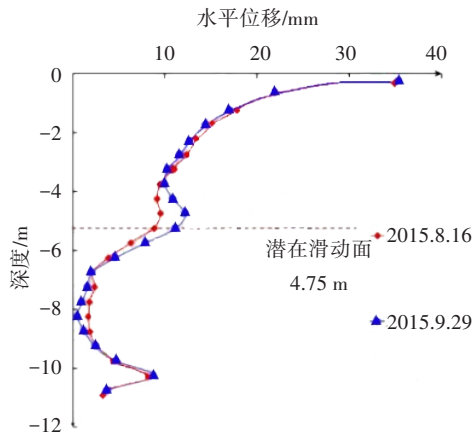
图1 依托工程坡体监测点位置图(单位:m)

Fig. 1 Location map of slope monitoring points for the supporting project(unit:m)

对坡体前缘桩号为YK38+192的监测点的监测数据进行坡体水平位移分析。在监测期间,施工现场有连续降雨。监测孔位置及监测曲线如图2所示。



(a) 监测孔位置图



(b) YK38+192 测斜孔深层水平位移

图 2 深层位移监测孔位置及测斜孔位移曲线

Fig. 2 Position of deep displacement monitoring hole and displacement curve of inclined hole

## 2 数值分析

目前,研究降雨入渗对堆积体边坡影响规律的数值分析方法主要以二维方法为主,未考虑计算断面的侧向约束、底滑面的空间曲率效应及临近隧道的施工影响。本研究基于实际工程案例,采用有限元软件 Midas GTS,建立三维数值模型,对降雨条件下隧道平行穿越堆积体的边坡进行稳定性分析。

### 2.1 数值模型与分析工况

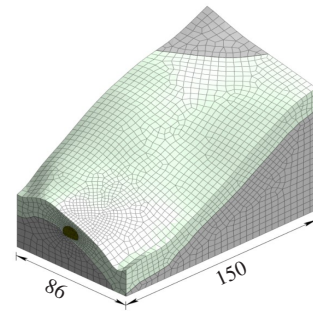
本研究以湖南省张家界市某高速公路的山岭右侧隧道为原型,参照该地的地勘资料,将坡体范围内的岩土体简化为两层均质、各向同性的弹塑性材料。其中,上部松散堆积层简化为 V 级围岩;基岩层为中风化砂质页岩,将其简化为 IV 级围岩。运用数值分析软件 Midas GTS 建立三维数值分析模型,采用三台阶弧形开挖预留核心土的方法模拟隧道右洞开挖过程,模型整体概况及网格划分情况如

表 1 材料物理力学参数

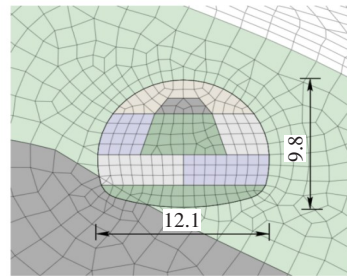
Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

材料	弹性模量 $E/$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )	泊松比	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	饱和重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	厚度或 直径/m	渗透系数/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
堆积层	200 000	0.35	20	21	35	28	—	$4.45\times 10^{-6}$
中风化砂质页岩	2 500 000	0.30	23	24	300	30	—	$1.25\times 10^{-9}$
锚杆	210 000 000	0.30	60	—	—	—	0.25	—
S-Va 初期支护	26 229 388	0.20	25	—	—	—	0.26	—
S-Vb 初期支护	26 024 340	0.20	25	—	—	—	0.24	—
S-IV 初期支护	23 505 576	0.20	25	—	—	—	0.22	—
S-Va 二次衬砌	28 000 000	0.20	26	—	—	—	0.50	—
S-Vb 二次衬砌	28 000 000	0.20	26	—	—	—	0.45	—
S-IV 二次衬砌	28 000 000	0.20	26	—	—	—	0.40	—

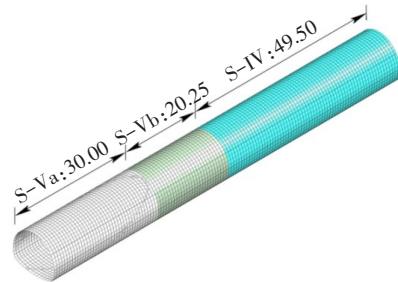
图 3(a)所示,隧道位置正视结构如图 3(b)所示,隧道衬砌网格及基本尺寸如图 3(c)所示。



(a) 三维模型轴测图



(b) 隧道位置正视图



(c) 隧道衬砌类型及长度

图 3 堆积层坡体与隧道模型网格划分及长度(单位:m)

Fig. 3 Mesh division and basic dimensions of accumulation slope and tunnel model(unit:m)

参照该工程的地勘资料和相关隧道设计规范,整理得到各材料的物理力学参数,见表 1。

由勘察资料可知,初始地下水位线位于基岩面以下,对坡面堆积层影响不大。坡体的左右两侧和底边均为不透水边界,在坡体前后分别设置宽度为5、15 m的水头边界。坡面设置为流量边界,流量大小与降雨强度相等。此外,根据湖南地方标准《降水强度等级》(DB43/T 2073—2021)与工程实地监测资料,将降雨强度分别取为10、40、100和300 mm/d,对应中雨、大雨、大暴雨和特大暴雨4个降雨等级。4种工况设置分别为:

- 1) 无降雨情况下进行隧道施工;
- 2) 在隧道开挖前降雨,降雨时长为1 d,降雨强度分别为10、40、100和300 mm/d;
- 3) 在隧道开挖前降雨,降雨时长为1~3 d,降雨强度为40 mm/d;
- 4) 分别在隧道开挖前、隧道开挖到第67个施工步(开挖深度为50.25 m)和隧道开挖结束(开挖深度为99.75 m)三个时间点开始进行降雨,降雨时长为1 d,降雨强度为40 mm/d。

## 2.2 计算结果分析

监测隧道入口处支护结构拱顶处的位移。在不同工况下,隧道入口拱顶位移变化曲线分别如图4~5所示。

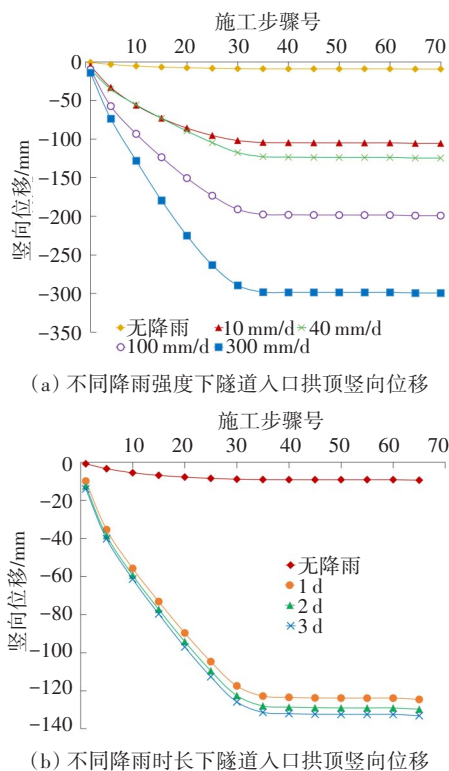


图4 不同降雨强度、时长下的隧道入口拱顶竖向位移  
Fig. 4 Vertical displacement of tunnel entrance vault corresponding to different rainfall intensities and durations

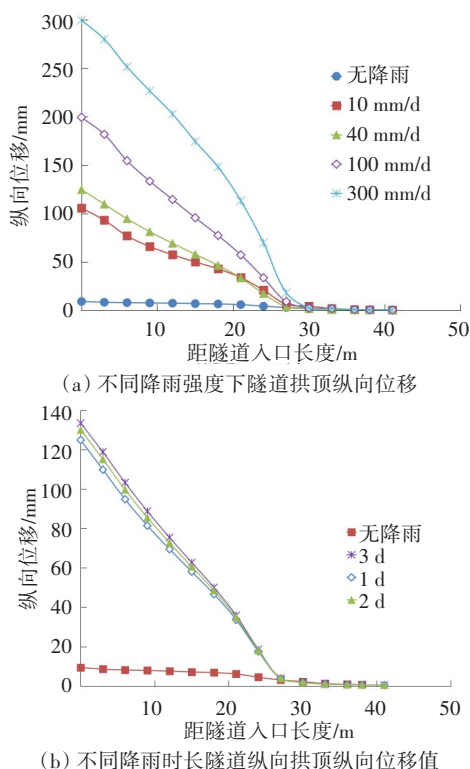


图5 不同降雨强度、时长下的隧道纵向纵向位移值  
Fig. 5 The longitudinal vault displacement of tunnel with different rainfall intensities and durations

从图4可以看出,随着施工步的增加,在降雨条件下施工与无降雨的情况相比,隧道入口处支护结构的拱顶竖向位移显著增加,且该竖向位移随降雨强度和时长增加而变大。从隧道施工开始到开挖的第32个施工步,竖向位移增长速度较快;此后,直至施工结束,竖向位移基本保持稳定(由于篇幅限制,仅给出前67个施工步的纵向位移变化曲线,下同)。

第32个施工步位于堆积层与基岩交界面附近。堆积层对降雨入渗和隧道开挖扰动的影响非常敏感,故从隧道施工开始至第32个施工步的时段内,隧道入口拱顶处产生了较大竖向位移。当隧道开挖进入基岩内部后,隧道施工对隧道入口拱顶沉降影响甚微,隧道洞壁周围形成了压力拱<sup>[13]</sup>,故此以后竖向位移基本处于稳定平衡状态。无降雨以及降雨强度分别为10、40、100和300 mm/d情况下的最终竖向位移分别为10、112、134、201和316 mm。降雨强度从中雨(10 mm/d)增强到特大暴雨(300 mm/d)时,在降雨1 d的情况下,隧道入口拱顶竖向位移增加了2倍。降雨结束一段时间后,该位移仍在增加,这说明降雨诱发的隧道拱顶竖向位移以及堆积层坡体坍塌事故具有一定的滞后性。

由于堆积体与基岩土质差异巨大,两者受到降雨入渗和隧道开挖扰动的影响程度也不相同。因此,堆积层和基岩内部的隧道拱顶受到挤压程度的差别较为明显,故本研究对不同开挖深度位置的隧道拱顶竖向位移曲线进行了分析。

从图5可以看出,在不同工况下,隧道入口处的拱顶纵向位移最大,越往里开挖,纵向位移越小。随着开挖逐渐进入基岩内部,纵向位移逐渐接近于0,纵向位移的转折点在堆积层与基岩分界面附近。稳定的基岩土质条件使降雨入渗和开挖扰动对隧道拱顶处纵向位移影响甚微,直至隧道开挖结束,纵向位移基本保持稳定。

降雨入渗和隧道开挖会使堆积层坡体产生挤压变形。坡体沿隧道方向的纵向位移是评判坡体挤压变形重要依据之一。因此,本研究对施工结束后的堆积层边坡纵向位移进行分析,在降雨时长为1 d,不同降雨强度下坡体纵向位移如图6所示;在降雨强度为40 mm/d,不同降雨时长下坡体纵向位移如图7所示。

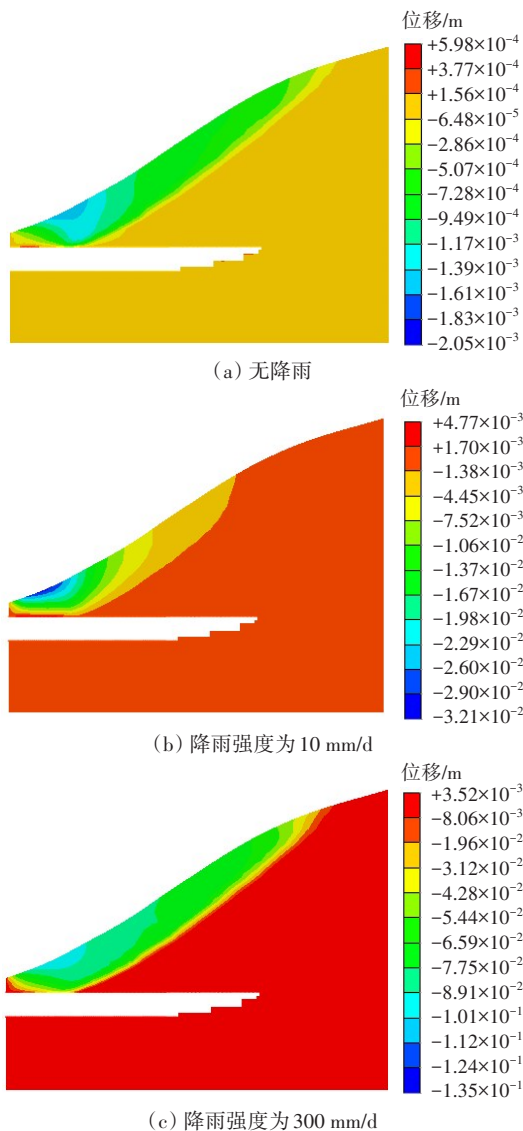


图6 不同降雨强度下坡体纵向位移图(降雨时长为1 d)  
Fig. 6 Longitudinal displacement diagram of downhill body with different rainfall intensities (rainfall duration:1 d)

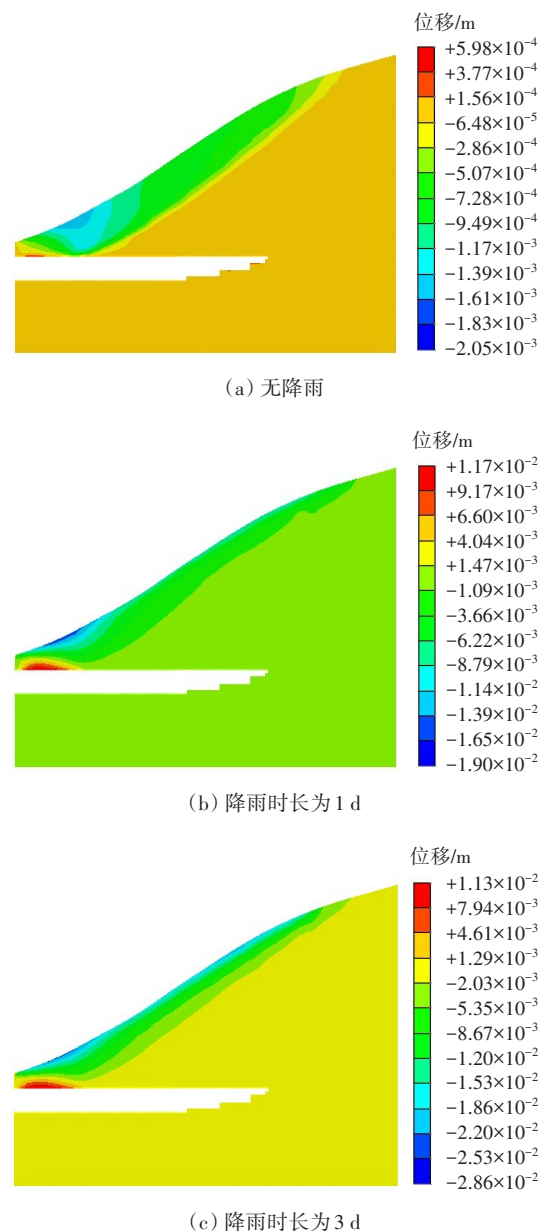


图7 不同降雨时长下坡体纵向位移云图(降雨强度为40 mm/d)  
Fig. 7 Cloud image of longitudinal displacement of downhill body with different rainfall durations (rainfall intensity:40 mm/d)

从图6~7可以看出,当施工结束后,隧道上方的堆积层土体受隧道开挖及降雨入渗影响较大,影响范围沿隧道方向逐渐向堆积层与基岩间基覆界面和坡体后缘延伸,坡体前缘隧道上方土体表面的纵向位移与内部的纵向位移方向相反。堆积层与基岩处的纵向位移差异明显,堆积层岩土体的纵向挤压变形较大,基岩的纵向挤压变形较小。随降雨强度增加与时间延长,该变化更加明显。无降雨时,隧道洞口上方土体的纵向位移最大值为2.05 mm;当降雨强度为300 mm/d,降雨1 d时,该

位移最大值达到了135.00 mm,是无降雨情况下纵向最大位移的65.85倍;当降雨强度为40 mm/d,降雨3 d时,该纵向位移最大值为降雨1 d情况下的1.50倍。

实际监测的水平位移与数值模拟的沿隧道走向水平位移的对比如图8所示。

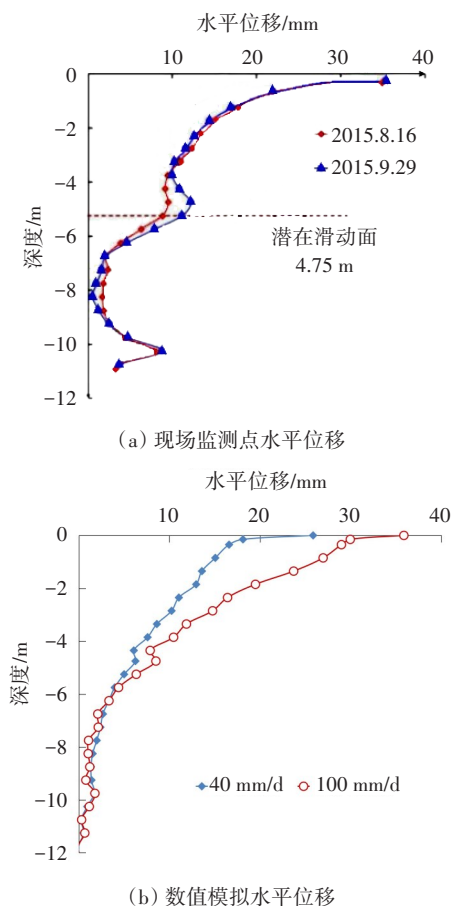


图8 现场监测数据与数值模拟结果的对比

Fig. 8 Comparison of field monitoring data and numerical simulation results

YK38+192 监测点在 40 mm/d 和 100 mm/d 两种降雨强度下的水平位移如图8所示, YK38+192 监测点距离隧道入口(即 YK38+230 监测点) 38 m。该处位于堆积层与基岩交界面 24 m 附近,在隧道模型切割面后方。监测数据与数值模拟数据均显示,水平位移在坡面处达到最大值。当降雨强度为 100 mm/d 时,坡面的数值模拟水平位移为 35 mm,与监测数据基本一致。当降雨强度为 40 mm/d 时,坡面的数值模拟水平位移为 26 mm。坡体水平位移随降雨强度提高而增大。从图8可以看出,在潜在滑动面附近,监测的水平位移与数值模拟水平位移曲线均出现转折,水平位移均

急剧减小并接近于0。该潜在滑动面位于距坡面 4.75 m 处。水平位移的数值模拟结果与实际监测数据较为吻合。

类似地,隧道周围的塑性区分布对隧道工程的稳定性分析也有十分重要的意义。在施工结束后,取堆积层与基岩交界面(开挖进尺的 24 m 处)为典型断面,采用结果云图对堆积层边坡塑性区分布规律进行分析,如图9~10所示。

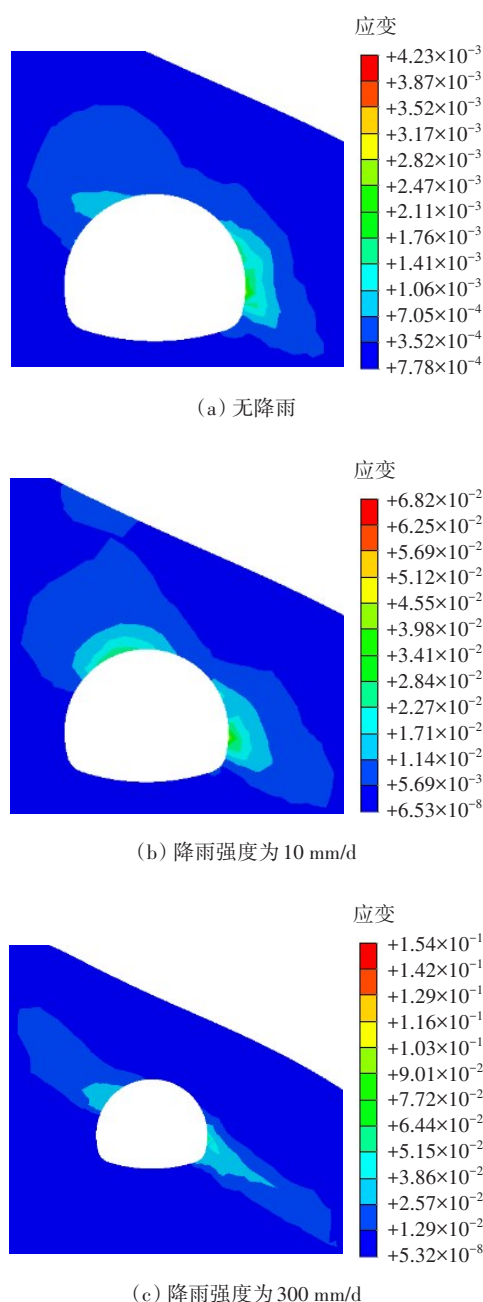


图9 不同降雨强度对应的坡体塑性应变云图(降雨时长为1 d)

Fig. 9 Plastic strain nephogram of downhill body with different rainfall intensities (rainfall duration: 1 day)

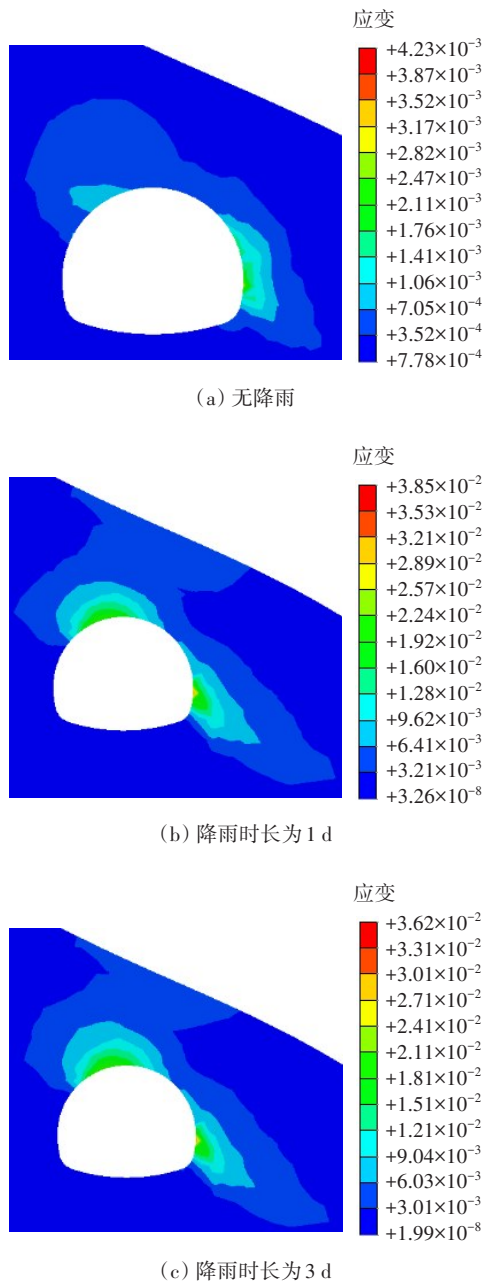


图 10 不同降雨时长对应的坡体塑性应变云图降雨 (降雨强度为 40 mm/d)

Fig. 10 Plastic strain nephogram of downhill body with different rainfall durations (rainfall intensity: 40 mm/d)

从图 9~10 可以看出,无降雨时,塑性区主要集中在隧道拱顶和右侧拱腰位置。其中,拱顶上方塑性区为隧道开挖跨度的 2/3 范围,右侧拱腰塑性区为隧道开挖跨度的 1/4 范围。随着降雨强度和降雨时长增加,隧道拱顶和右侧拱腰位置的塑性区向隧道上方和右侧不断发展,即沿着堆积层与基岩分界面逐步向外扩散,最终扩散到堆积层坡体表面。当降雨强度达到 10 mm/d 时,塑性区范

围扩大到与隧道开挖跨度基本相等。当降雨强度达到 300 mm/d 时,隧道周围塑性区沿着堆积层与基岩分界面形成长约 46 m 的带状区域。类似地,降雨强度为 40 mm/d,降雨 3 d 时的隧道周围塑性区范围也比同等降雨强度下降雨 1 d 时的大,此现象在拱顶上方位置尤为明显。

在降雨入渗和隧道开挖的共同作用下,隧道入口拱顶是最容易发生剪切破坏的地方。本研究对不同降雨条件下隧道入口处拱顶的最大剪应力变化情况进行分析,结果如图 11 所示。

从图 11 可看出,随着施工的进行,在所有降雨条件下,隧道入口拱顶处的最大剪应力变化趋势基本一致。与无降雨情况相比,有降雨发生情况的最大剪应力增加得更明显,且增幅随降雨强度和时长的增加而变大。从隧道施工开始到堆积层与基岩分界面的第 32 个施工步期间,剪应力急剧增长。这主要是因为隧道施工和降雨的共同作用改变了堆积层土体力学参数,在隧道拱顶处产生了较大的剪应力,尤其是降雨强度和时长增加后,更加剧了该效应。当隧道开挖进入基岩内部后,降雨和施工对隧道洞口影响开始逐渐减弱,剪应力保持平稳直至施工结束。

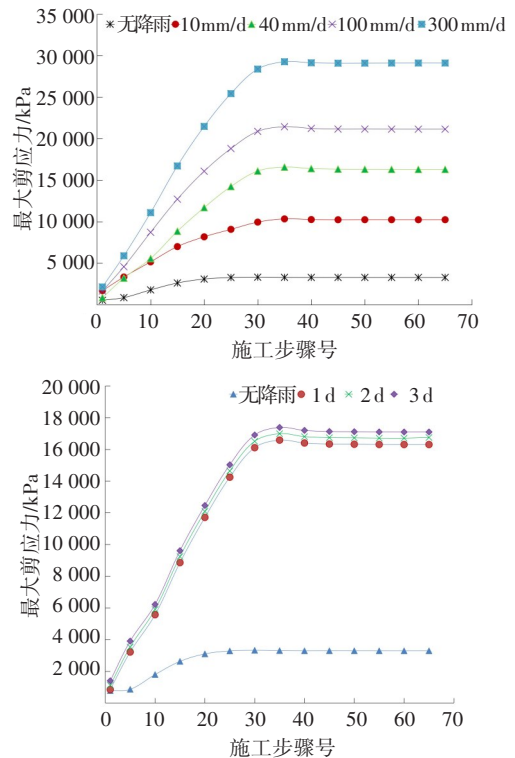


图 11 降雨强度、时长对隧道入口拱顶剪应力的影响规律  
Fig. 11 Influence of rainfall intensity and duration on shear stress of tunnel entrance vault

当降雨强度为300 mm/d时,隧道入口处拱顶最大剪应力为29 155 kPa,分别是无降雨和降雨强度10、40、100 mm/d情况下的8.82、2.84、1.78和1.38倍。在40 mm/d降雨强度下,若降雨时长分别为1、2和3 d时,隧道入口拱顶处的最大剪应力值分别为16 343、16 789和17 134 kPa,差别不大。这说明增加降雨强度,可使隧道入口处拱顶最大剪应力显著增加。若不采取有效措施,隧道入口处拱顶在极端暴雨情况下极易发生剪切破坏<sup>[14]</sup>。

本研究探讨在隧道的不同开挖阶段降雨对隧道的受力及变形的影响。以最容易发生破坏的隧道入口拱顶处为分析对象,考虑降雨强度为40 mm/d,降雨时长为1 d情况下的最大剪应力和竖向位移值的变化规律,具体如图12所示。

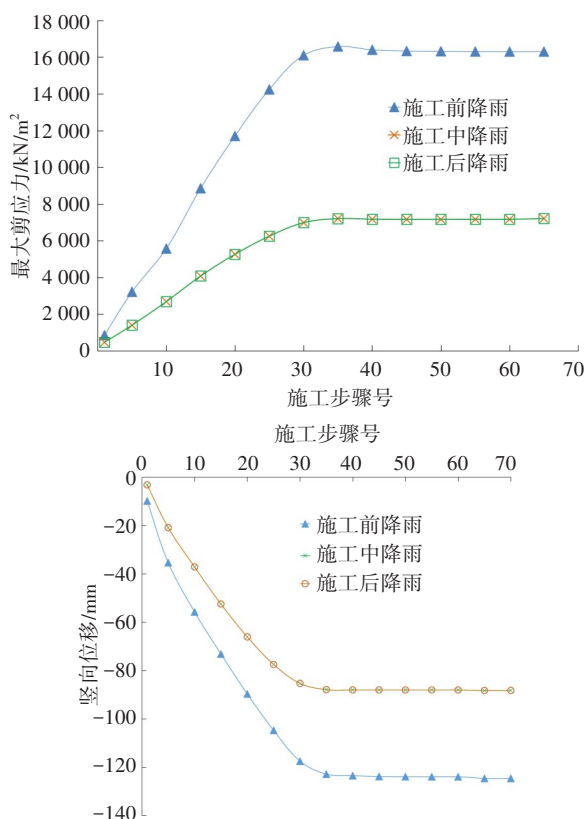


图12 降雨对于隧道入口剪应力和竖向位移的影响规律

Fig. 12 Effect of rainfall on shear stress and vertical settlement at tunnel entrance

从图12可以看出,在隧道入口拱顶处,最大剪应力和竖向位移值均在隧道开挖前发生降雨的情况下最大。隧道开挖到第67个施工步时,降雨的最大剪应力和竖向位移的影响规律与隧道开挖结束后再降雨情况下的规律类似。这说明隧道开挖到一半发生降雨对隧道入口拱顶的竖向位移与最大剪应力的影响与隧道开挖结束后再降雨的影响类似。

这是因为在这两种情况下,隧道施工均已经进入到基岩内部,隧道入口已做好支护措施,有效地减小了降雨入渗对隧道入口拱顶的不利影响。在隧道开挖前发生降雨,隧道入口拱顶处最大剪应力值为16 304 kPa,约为隧道开挖到一半降雨或隧道开挖结束再降雨情况下的2.26倍;其最大竖向位移为隧道开挖到一半降雨或隧道全部开挖完再降雨情况下的1.41倍。这说明隧道开挖前降雨相对于隧道施工中降雨和隧道开挖结束后再降雨对隧道施工是最不利的,必须做好隧道入口的安全防护工作。

### 3 结论

1) 在降雨条件下,隧道穿越堆积体边坡进行施工时,降雨入渗作用于堆积层边坡会影响堆积层坡体内部隧道支护结构的受力和变形,隧道开挖产生的施工扰动又会对周围堆积体边坡的应力和变形产生一定影响。

2) 与无降雨情况相比,降雨情况下的堆积层坡体和隧道支护结构的受力和位移增加显著,且随降雨时长增加和降雨强度提高,堆积层坡体和隧道支护结构的受力和位移也随之增加。其中,降雨强度的作用更为明显。在降雨强度从10 mm/d增加到300 mm/d,降雨时长为1 d的情况下,隧道入口拱顶处的竖向位移和最大剪应力值均增加了2倍。而在隧道开挖的不同阶段,降雨对堆积层和隧道支护结果的影响则无明显差异。

3) 在降雨结束后,堆积层坡体和隧道拱顶位移仍在持续发展,这表明降雨诱发隧道拱顶沉降甚至坍塌具有一定的滞后性,降雨停止后隧道坍塌事故仍有可能发生。

### 参考文献(References):

- [1] 陈红旗,黄润秋,林峰.大型堆积体边坡的空间工程效应研究[J].岩土工程学报,2005,27(3):323-328.  
CHEN Hongqi, HUANG Runqiu, LIN Feng. Study on the spatial engineering effect of large accumulation slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3):323-328.
- [2] 胡伟.松散堆积体区域隧道洞口段稳定性分析研究[D].湘潭:湖南科技大学,2016.



- HU Wei. Study on tunnel portal stability analysis of loose deposit[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2016.
- [3] 田莉. 圆宝山隧道松散堆积体的力学试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(6): 8-12.
- TIAN Li. Study on mechanical properties of loose deposits in Yuanbaoshan tunnel [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017, 31(6): 8-12.
- [4] 左自波. 降雨诱发堆积体滑坡室内模型试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- ZUO Zibo. Investigation on rainfall-induced colluvium landslides using laboratory model tests [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [5] 张书华, 张海龙, 赵中华. 降雨条件下体积含水率对堆积体边坡渗流特性的影响研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 827-834.
- ZHANG Shuhua, ZHANG Hailong, ZHAO Zhonghua. Influence of volumetric water content on seepage characteristics of accumulation slope under rainfall [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 827-834.
- [6] 谢琳. 基于模糊数学的降雨条件下边坡渗流特性及稳定性分析[D]. 长沙理工大学, 2015.
- XIE Lin. Analysis of seepage characteristics and stability of slope under rainfall condition based on fuzzy mathematics [D]. Changsha University of Science and Technology, 2015.
- [7] 孙国庆. 地震和降雨影响下松散堆积体边坡的稳定性研究: 以昭巧二级公路边坡为例[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- SUN Guoqing. Research on stability of loose deposit slope influenced by earthquake and rainfall—Illustrated by the example of a secondary road named Zhao Qiao [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [8] 马杲宇, 陈子全, 杨文波, 等. 浅埋偏压隧道穿越松散堆积体支护结构受力特性分析[J]. 路基工程, 2019(4): 20-26.
- MA Gaoyu, CHEN Ziquan, YANG Wenbo, et al. Analysis on mechanical properties of supporting structure of shallow buried tunnel passing through loose accumulation body under asymmetric load [J]. Subgrade Engineering, 2019(4): 20-26.
- [9] 周强, 黄永强. 松散堆积体中浅埋小净距隧道施工期位移和应力场的2D分析[J]. 公路工程, 2011, 36(4): 16-21, 25.
- ZHOU Qiang, HUANG Yongqiang. 2D numerical analysis of shallow closely-spaced twin tunnels in loose deposits [J]. Highway Engineering, 2011, 36(4): 16-21, 25.
- [10] 李天斌, 刘梁, 陈国庆. 隧道穿越泥石流堆积体的数值模拟及优化处治[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 712-718.
- LI Tianbin, LIU Liang, CHEN Guoqing. Numerical simulation and optimization of treatment measures for a tunnel excavated through debris flow fan [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 712-718.
- [11] 李侑军. 邻近堆积体边坡的隧道开挖特性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- LI Youjun. The research on characteristics of tunnel excavation built in accumulation slope [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.
- [12] 叶钰梁. 堆积层边坡与邻近平行隧道相互作用机理研究[D]. 长沙理工大学, 2020.
- YE Yuliang. Study on interaction mechanism between accumulation layer slope and adjacent parallel tunnel [D]. Changsha University of Science and Technology, 2020.
- [13] 晏莉, 喻少华, 文胜. 隧道压力拱理论及试验进展研究[J]. 公路与汽运, 2021(2): 137-142, 146.
- YAN Li, YU Shaohua, WEN Sheng. Research on theory and experimental progress of tunnel pressure arch [J]. Highways & Automotive Applications, 2021 (2): 137-142, 146.
- [14] 曹媛媛, 刘辉, 刘耀坤, 等. 基于流固耦合作用的偏压连拱隧道稳定性分析[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 56-61.
- CAO Yuanyuan, LIU Hui, LIU Yaokun, et al. Analysis on the stability of fluid-solid coupling in a bias double-arch tunnel [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 56-61.

(责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:李岳林)