

# 降雨入渗对隧道下穿路基段边坡变形稳定性的影响分析

谢伟东<sup>1,2</sup>

(1. 中铁建贵州建设有限公司 贵州 贵阳 550029; 2. 西安建筑科技大学 隧道与地下结构工程研究所, 陕西 西安, 710055)

**摘要:** 隧道下穿运营高速公路路基边坡施工扰动造成既有路基边坡的松动和变形, 降雨入渗引起的下滑力增加和滑面抗剪强度的降低进一步加剧了边坡的变形, 考虑降雨入渗和隧道下穿施工影响的路基边坡稳定性分析及确定合理、可行的加固方案对确保路基边坡的稳定性尤为重要。以贵阳轨道交通 1 号线下穿西地铁隧道下穿运营高速公路路基边坡工程为背景, 考虑雨水入渗条件下隧道施工扰动对边坡稳定的影响, 基于路基边坡土体的土-水特征曲线特性构建非饱和土体的流固耦合计算模型, 分析雨水入渗条件下扰动路堤边坡的位移、塑性区特性和路堤边坡的安全性, 分析结果表明降雨入渗对含软弱夹层的路基边坡稳定性影响显著, 造成路堤边坡沿该弱面的塑性区贯通; 考虑降雨的影响, 经历降雨影响后的边坡安全系数降低, 低于原边坡的安全系数, 因此对受临近施工扰动的边坡需要考虑不同降雨次数后边坡安全性的累积作用。考虑降雨对扰动路堤边坡的影响, 对比分析了锚索和抗滑桩加固措施对边坡滑移的控制效果, 建议并实施了路堤边坡的施工, 取得了良好效果。

**关键词:** 边坡工程; 隧道下穿施工; 雨水入渗; 流固耦合; 数值模拟;

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)04-0470-08

## Impact analysis of rainfall infiltration on the deformation mechanism and stability of roadbed slope

XIE Weidong<sup>1,2</sup>

(1. China Railway Construction Guizhou Construction Co., Ltd., Guiyang 550029, China;

2. Institute of Tunnel and Underground Structure Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Rainfall has important influence on slope stability, it has been a hot and difficult topic to study the mechanical knowledge of unsaturated soil for simulating the deformation of unsaturated soil roadbed slope under the condition of rainfall infiltration. This paper adopted the unsaturated soil fluid-solid coupling calculation model which considering hydraulic permeability coefficient and soil-water characteristic curve for the numerical analysis about the seepage field and stress field coupling of unsaturated roadbed slope under the condition of rainfall infiltration to calculate the stability about the interaction between roadbed slope and tunnel. The results show that rainfall infiltration has a significant influence on the stability of roadbed slope with weak interlayer, meanwhile the slope safety factor and potential sliding surface position are different under the condition of same rainfall intensity with different rainfall duration, which is based on the project of Guiyang No. 1 rail transit line underpass the roadbed slope of existing expressway. At the same time, this paper also discusses the control effects of different reinforcement measures to reduce the slope slippage, and it is concluded that the anchorage cable reinforcement can effectively reduce the slope slippage.

**Key words:** slope engineering; tunnel underpass construction; rainwater infiltration; flow solid coupling; numerical simulation

西南山区的城市地铁工程建设中, 受隧址地形、地质和地铁线路周边建(构)筑物的影响, 在建工程与已有工程交叉重叠的临近施工量大面广; 隧道下穿既有运营公路、铁路等工程施工的典型案例越来越多<sup>[1-2]</sup>。新建隧道下穿既有运营高速公路路基边坡工程的施工中, 新建隧道下穿施工势

必会引起已有路基边坡土体的扰动, 特别是在降雨入渗情况下, 扰动影响更容易引起路基边坡的滑移破坏。针对隧道下穿施工对既有边坡的影响问题, 国内外诸多专家做了大量的研究, 提出了雨水入渗是诱发扰动施工边坡变形失稳的主要因素<sup>[3-4]</sup>; 中国南方多雨地区的天然土坡和道路、岸

收稿日期: 2019-12-27

修改稿日期: 2020-07-22

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划-创新团队基金资助项目(2020TD-005); 陕西省住房城乡建设科技计划基金资助项目(2019-K39)

第一作者: 谢伟东(1972—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事施工建设管理工作。E-mail: 946867789@qq.com

坡等构筑边坡雨季频发的失稳破坏也进一步表明降雨是诱发边坡失稳破坏的主要因素之一。诸多专家对边坡稳定性与降雨间的对应关系进行系统研究, 结合非饱和土的强度理论, 提出了边坡非饱和和区孔隙水压力受雨水入渗增大造成边坡潜在滑面上的土体的抗剪强度降低; 同时, 降雨入渗增加了边坡土体的自重, 下滑力增加, 进而增大了边坡的失稳概率<sup>[5-6]</sup>。边坡降雨入渗分析是典型的非饱和土的流固耦合问题, 是当前环境岩土、边坡工程和岩土工程界共同面临的难题之一。针对非饱和土的流固耦合分析问题, Thomas 等提出了考虑非饱和土体变形的热-气-水的运动耦合理论<sup>[7]</sup>, Wong 等研究了非饱和土的固结耦合<sup>[8]</sup>, 张延军等系统研究了非饱和土流固耦合模型<sup>[9]</sup>, Fredlund 等构建了考虑基质吸力的非饱和土体的强度函数<sup>[10]</sup>; 为在数值模拟分析中考虑降雨的影响, Galerkin 等提出了将位移与孔隙水压力作为节点自由度离散的单元受力平衡和渗流的连续性方程<sup>[11]</sup>; Cho S E 等构建了基于基质吸力的土体渗透系数函数关系, 为雨水入渗下土体强度的定量计算提供了支持<sup>[12]</sup>。为考虑降雨入渗条件下的地铁隧道下穿高速公路路堤边坡的稳定性, 以贵阳轨道交通 1 号线下麦西地铁隧道下穿运营高速公路路基边坡工程为背景, 采用可考虑水力渗透系数变化和反应土-水特征曲线特性的非饱和土流固耦合有限元软件, 模拟下穿隧道施工扰动路堤边坡在降雨入渗工况下的变形稳定特性, 分析扰动边坡体降雨诱发潜在滑面变形失稳的机理; 基于下穿隧道施工扰动边坡降雨入渗变形机制, 探讨了路堤边坡经济、合理的加固方案, 以期指导路堤边坡的加固设计, 确保既有高速公路的运行安全及下穿隧道施工安全。

## 1 模型计算理论

### 1.1 基本方程

土单元受力及水、气质量平衡方程分别表示为式(1)、式(2)和式(3)。

$$\frac{\partial (\sigma_{ij} - \delta_{ij} u_a)}{\partial x_j} + \frac{\partial u_a}{\partial x_j} + b_i = 0 \quad (1)$$

$$[\rho_a n(1 - S_r + HS_r)]_t + [\rho_a (\nu_{ai} + H\nu_{ui})]_t = 0 \quad (2)$$

$$(\rho_w n S_r)_i + (\rho_w v_{ui})_i = 0 \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{ij}$  为总应力;  $\delta_{ij}$  为克罗内克常数;  $\mu_a$  为孔隙气压力;  $b_i$  为体积力;  $\rho_w$ 、 $\rho_a$  分别为土体内的水密度、气体密度;  $n$  为土体孔隙率;  $S_r$  为土体饱和度;

$v_{ui}$ 、 $v_{ai}$  分别为土体中水与气体的速度;  $H$  代表亨利系数; 式(2)与式(3)分别表示对时间  $t$  和坐标  $x_i$  求导。

不考虑空气质量, 土体密度  $\rho$  由固、液体密度和孔隙率决定。

$$\rho = (1 - n)\rho_s + nS_r\rho_w \quad (4)$$

式中:  $\rho_w$ 、 $\rho_a$  分别为土体内的水密度、气体密度;  $n$  为土体孔隙率;  $S_r$  为土体饱和度。

### 1.2 渗流-应力场耦合分析

选用 Galerkin 等<sup>[11]</sup>提出的有限元格式, 将节点位移与孔隙水压力作为节点自由度离散, 受力平衡和渗流连续方程写为式(5)和式(6)。

$$[K]\{\Delta\bar{\delta}\} - [L]\{\Delta\bar{p}\} = \{F\} - \{I\} \quad (5)$$

式中:  $[K]$  为刚度矩阵;  $\{\Delta\bar{\delta}\}$  为位移增量;  $[L]$  为节点处孔隙水压力的分量;  $\{\Delta\bar{p}\}$  为孔隙水压力增量;  $\{F\}$  为节点外荷载;  $\{I\}$  为增量迭代计算时上一步中的不平衡力。

$$[\bar{B}]\{\bar{v}\} + [\bar{H}]\{\bar{p}\} = \{Q\} \quad (6)$$

式中:  $[\bar{B}]$  为伴随节点变形率的体积变化量;  $\{\bar{v}\}$  为  $\{\bar{\delta}\}$  关于时间的导数;  $[\bar{H}]$  为伴随孔压变化的体积变化量;  $\{\bar{p}\}$  为孔隙水压力;  $\{Q\}$  为节点流量。

利用时间积分求解耦合方程, 差分公式表示为式(7)。

$$\{\bar{\delta}\}_{t+\Delta t} = \{\bar{\delta}\}_t + \Delta t[(1 - \xi)\{\bar{v}\}_t + \xi\{\bar{v}\}_{t+\Delta t}] \quad (7)$$

式中:  $\xi$  为一系数,  $0 \leq \xi \leq 1$ ;  $\Delta t$  为时间增量。

为保证数据的稳定与可靠, 选择  $\xi = 1$  (后向差分法), 用牛顿迭代进行线性化, 则耦合控制方程可表示为式(8)。

$$[K]\{\Delta\bar{\delta}\} - [L]\{\Delta\bar{p}\} = \{F\} - \{I\} - \quad (8)$$

$$[B]\{\Delta\bar{\delta}\} - \Delta t[H]\{\Delta\bar{p}\} = \{M\}$$

式中:  $\{M\}$  为流体体积变化修正量;  $[B]$  为伴随节点变形的流体体积变量,  $[H]$  为伴随孔压变化流体体积变量。

方程(8)作为时间增量  $\Delta t$  内迭代求解的基元应用于渗流-应力场耦合求解, 该方程还应满足各种边界条件; 单元发展到塑性阶段时将弹性矩阵改为弹塑性矩阵, 进行塑性迭代。

### 1.3 渗透系数特征曲线、土-水特征曲线

饱和土体内, 水力渗透系数为常量, 非饱和土中该值随基质吸力  $\psi$  与土体含水量变化, 参照文献<sup>[11]</sup>, 渗透系数定为关于基质吸力的函数。

$$k_w = a_w k_{ws} / [a_w + \{b_w(u_a - u_w)\}^{c_w}] \quad (9)$$

式中:  $k_w$  为渗透系数;  $a_w, b_w, c_w$  为参数, 由文献[12]确定;  $k_{ws}$  为饱和渗透系数;  $u_a$ 、 $u_w$  为孔隙气压力和孔隙水压力;  $(u_a - u_w)$  为基质吸力, 用  $\psi$  表示。

同样由文献[12]定义土-水特征曲线为

$$S_r = S_i + (S_n - S_i) a_s / [a_s + \{b_s(u_a - u_w)\}^{c_s}] \quad (10)$$

式中:  $S_r$  为土体饱和度;  $S_i$  为残余饱和度;  $S_n$  为最大饱和度;  $a_s, b_s, c_s$  为常数, 由文献[12]确定。

由式(9)、(10)知水力渗透系数  $k_w$ 、土体饱和度  $S_r$  与基质吸力  $\psi$  具有负的非线性相关性。

## 2 非饱和土边坡的稳定性分析

### 2.1 非饱和土的强度理论

1978 年, Fredlund<sup>[10]</sup> 提出了基质吸力  $\psi$  的概念, 即非饱和土体强度为净法向应力  $(\sigma_n - u_a)$  与基质吸力  $(u_a - u_w)$  的函数, 即

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (11)$$

式中:  $\tau_f$  为土体抗剪强度;  $c'$  为土体有效粘聚力;  $\varphi'$  为土体有效内摩擦角;  $\sigma_n$  为正应力;  $\varphi_b$  为基质吸力  $\psi$  带来的摩擦角增量。

### 2.2 强度折减法在边坡稳定性分析中的应用

非饱和土边坡在考虑降雨入渗时, 应当进行土体的饱和-非饱和渗流分析, 以得到各单元的应力、应变分布; 以此为基础, 应用强度折减法 (SRM) 求边坡安全系数<sup>[13]</sup>。该方法是把土体强度参数  $c, \varphi$  同除一折减系数  $F_s$ , 然后再次试算得到新参数  $c_{new}$  和  $\varphi_{new}$ , 直到模型不收敛, 该折减系数即为边坡安全系数; 对应的贯通滑面即为潜在滑动面。强度参数的折减方法为

$$\begin{cases} c_{new} = c/F_s \\ \varphi_{new} = \arctan(\tan \varphi/F_s) \end{cases} \quad (12)$$

因此, 该方法不必假设滑面潜在位置和形状, 应用较方便。

## 3 考虑降雨影响的稳定性分析

### 3.1 计算条件

取背景工程贵阳 1 号轨道线下麦西隧道穿越高速公路 K69+240 处边坡工程, 研究雨水入渗对边坡稳定性的影响。由上到下, 边坡土层分别是填筑土、粘土、二叠系上统龙潭组页岩、三叠系下统大冶组灰岩, 边坡岩石风化严重。由于岩土体的渗透性与岩石的风化程度紧密相关, 因

此, 按工程边坡地层的风化程度划分研究对象的渗流特性。考虑降雨入渗条件的隧道下穿路堤边坡稳定性分析, 为保证计算结果可靠有效, 充分考虑渗流影响范围, 模型具体尺寸为:  $X$  方向为 120 m,  $Y$  方向为 72 m,  $Z$  方向为 60 m, 如图 1 所示。

边坡土体及路面材料采用修正 Mohr-Coulomb 弹塑性模型; 本研究考虑降雨作用下隧道及边坡受力与位移, 对隧道支护系统简化处理, 采用各向同性的弹性模型。结合工程地质勘察资料及室内试验测得各土层参数见表 1。

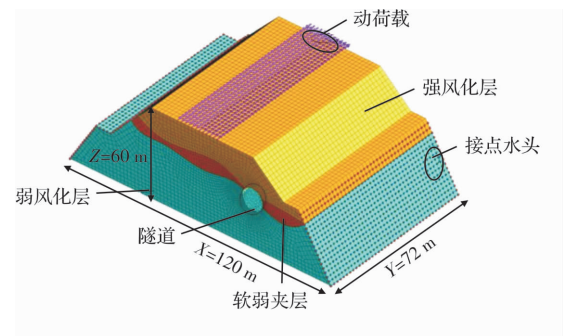


图 1 路基边坡三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of the roadbed slope

表 1 土体参数

Tab. 1 The soil parameter

参数	$E$ /GPa	$\gamma$ /kN · m <sup>3</sup>	$\mu$	$c$ /kPa	$\varphi$ /°	$k_{ws}$ /m · s <sup>-1</sup>
强风化层	0.000 7	22.50	0.43	38.30	35.00	$1.85 \times 10^{-4}$
软弱夹层	0.005 5	17.76	0.35	40.00	6.00	$9.82 \times 10^{-6}$
弱风化层	3.500 0	26.42	0.40	45.00	35.00	$2.56 \times 10^{-10}$

### 3.2 模型边界条件确定及降雨强度处理方法

在初始水位边界的基础上增加坡面渗流边界模拟降雨。渗流计算时, 根据钻孔资料以及初始地下水水位线, 将边坡体左右边界视为定水头边界, 底边界看作不透水边界, 地表视为降雨入渗边界。约束侧边界水平位移和底边界水平、竖向位移, 进行计算。具体情况如图 2 所示。

因雨水入渗过程的复杂性, Mein 和 Larson 用降雨量  $q$ 、土壤容许入渗量  $f_p$  及饱和渗透系数  $k_{ws}$  等 3 个参数分析雨水入渗的情况<sup>[10,14]</sup>:

(1) 当  $p < k_{ws}$  时, 不发生地表径流, 雨水全部入渗;

(2) 当  $f_p > q > k_{ws}$  时, 降雨全部入渗,  $f_p$  随降

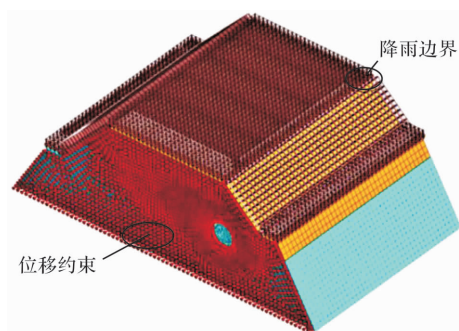


图2 降雨与位移约束边界

Fig. 2 Rainfall and displacement constraint boundary

雨时间的持续而降低, 但入渗率不发生变化;

(3) 当  $q > f_p$  时, 因降雨量超过容许入渗量, 边坡产生地表径流, 边坡土体的入渗率降低。

### 3.3 降雨入渗影响结果分析

#### (1) 边坡孔隙水压力分布

通过查阅贵阳历史气象资料, 取最大降雨量 200 mm/d, 分析初始稳定边坡受不同持续时间的降雨影响情况。对应 200 mm/d 降雨量时边坡土体的孔隙压力变化云图见图 3 所示。

在降雨的初期, 表层边坡的孔隙水压力最大值为  $-352.21$  kPa; 在持续降雨作用下, 雨水由坡面向边坡的内部渗流, 当  $t = 8$  d 时, 降雨入渗到边坡原坡面和填筑路堤面形成的软弱夹层区域; 此时, 边坡土体中的孔隙压力出现了明显变化, 其孔隙水压力由负值逐渐转为正直, 此时, 边坡体中的最大孔隙水压力达  $60.72$  kPa。就边坡体总体而言, 孔隙水压力在边坡整体范围均呈现为增加状态, 特别是在边坡体中的软弱夹层区域, 其压力值由负变正, 造成潜在滑面上的有效应力降低, 边坡的失稳概率增大。

在降雨结束后, 表层雨水不再补给, 但边坡深部水的继续渗流使得软弱夹层区域内土体的孔隙水压力随时间仍有所增大; 同时, 在边坡的表面, 上层土体因蒸发作用, 其孔隙水压力的正值区域不断减小, 边坡体的下滑力减小, 但其过程进展缓慢。

#### (2) 边坡土体塑性区的变化

图 4 给出了不同降雨时刻路堤边坡塑性区的变化云图。由图 4 可见, 考虑隧道下穿施工的影响, 隧道通过路堤边坡后, 边坡塑性区在降雨的初期主要出现在隧道的拱顶、边坡的坡脚及边坡的软弱夹层部位, 且塑性区的范围较小; 随着降雨时间的持续, 边坡中的塑性区范围由坡脚向坡顶位置发展, 同时在坡体内部沿软弱夹层带向边坡的

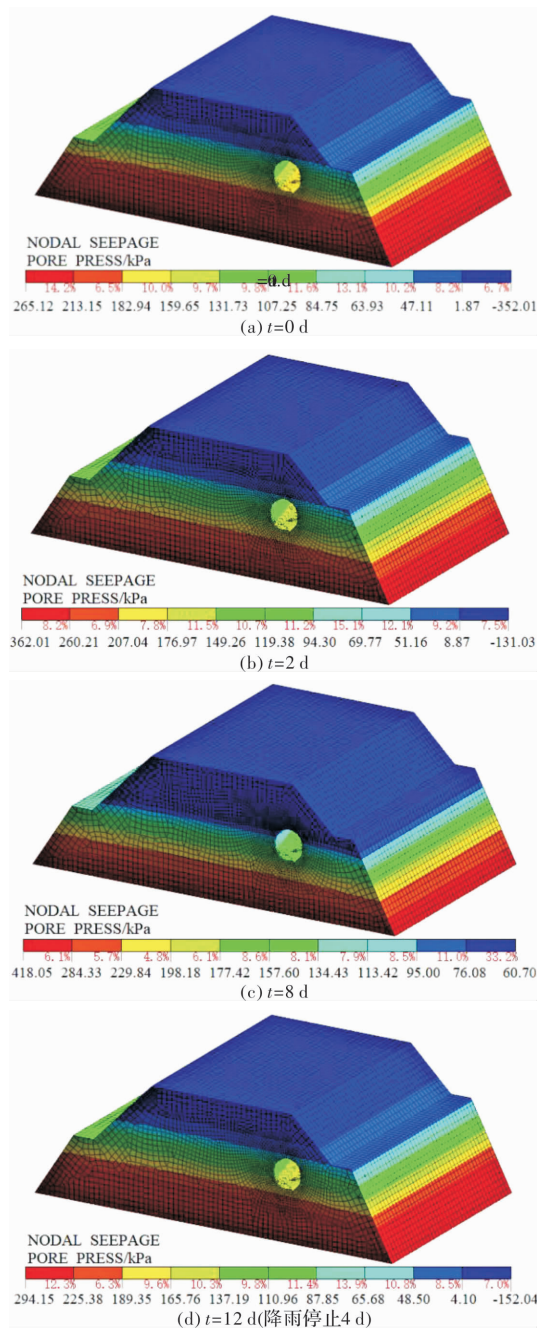


图3 雨量为 200 mm/d 时孔隙水压力变化云图

Fig. 3 The variational cloud diagram of pore water pressure when rainfall intensity is 200 mm/d

深处扩展, 其分布范围逐渐增大, 并最终形成连续的区域; 在降雨停止后, 随坡体中的地下水的继续下渗及边坡表层地下水的蒸发, 边坡内的塑性区分布范围又逐渐的减小。

分析降雨入渗过程中边坡的稳定性状态及边坡体内软弱夹层的稳定状态, 随着降雨的入渗, 边坡土体由原来的非饱和状态逐渐向饱和状态转变, 土体中的孔隙压力增大, 基质吸力降低; 同时, 降雨入渗造成边坡中土体自重的增加, 加大下滑力; 另一方面, 边坡土体塑性区的发展, 土体的粘聚力和内摩擦角减小, 抗剪强度降低。分



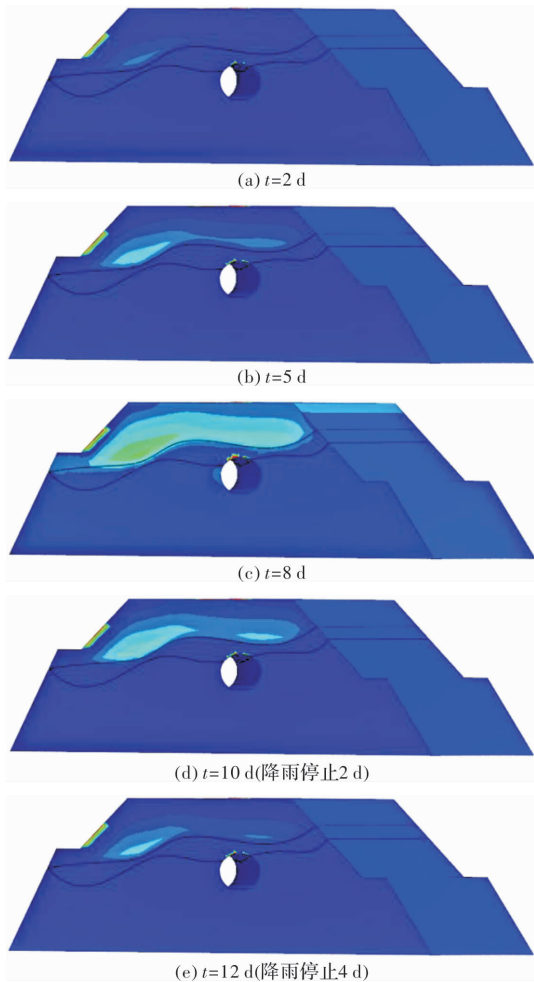


图4 持续降雨时边坡塑性区变化云图

Fig. 4 The variational cloud diagram of roadbed slop plastic zone during continuous rainfall

析降雨入渗引起的边坡软弱夹层中塑性区的变化,由图4知,随着降雨时间的增加,边坡中的塑性区沿软弱夹层区域扩展,最终发展至边坡的坡面,说明软弱夹层对降雨入渗非常敏感,软弱夹层的存在不利于边坡的稳定,特别在持续降雨时,此处将成为边坡的潜在滑移面。

### (3) 边坡位移的变化

图5为不同持续时间的降雨作用下边坡的位移变化云图。由图5可知,在降雨的初期,下穿路堤边坡隧道的拱顶、边坡的坡顶与坡脚处的位移较大,此时,隧道拱顶处的位移为6.80 mm;当降雨持续到第5天时,边坡在软弱夹层部位出现最大位移,其值达到了24.30 mm;随时间的延续,该处的位移值逐渐的增大,且大变形的范围也逐渐增加;在降雨停止时( $t=8$  d),边坡中的最大位移达到36.60 mm。

从图5中给出的不同持续时间边坡位移云图的对比分析可知,雨停初期,由于雨水的继续入渗,边坡的整体位移逐渐增大,在降雨停止4 d后的第

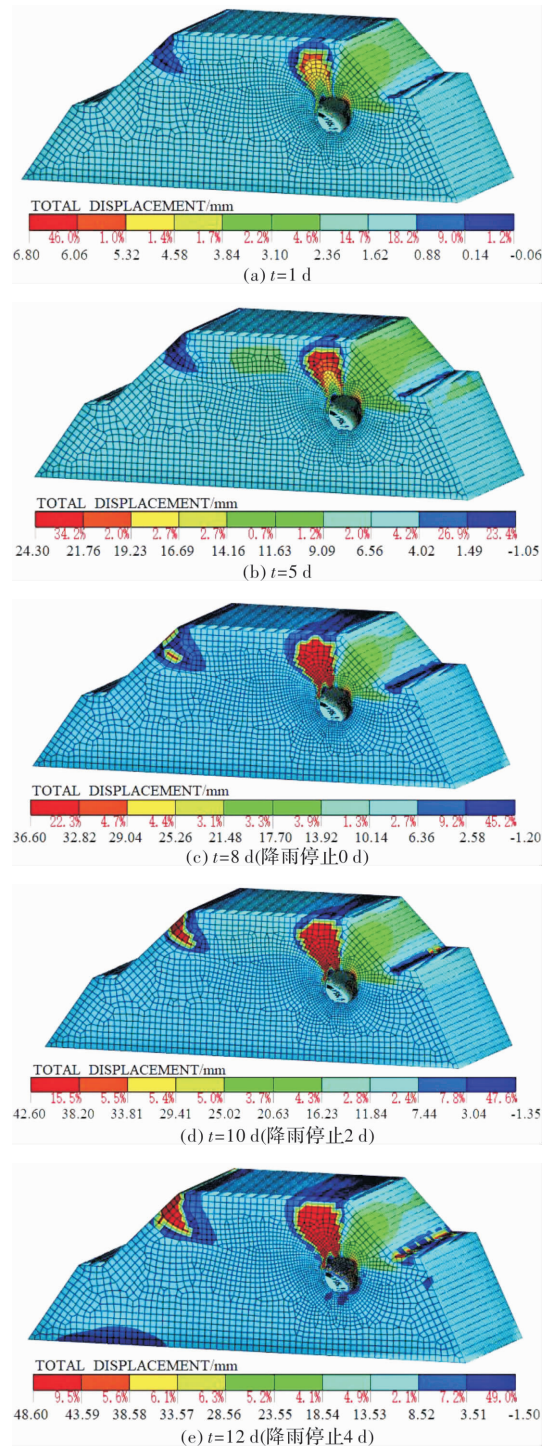


图5 边坡总位移云图

Fig. 5 Total displacement cloud diagram of roadbed slop 12天,边坡中出现最大位移,其值达到48.60 mm,其后位移逐渐减小,边坡最终趋于稳定。就位移发展的趋势而言,在降雨持续过程中,边坡位移主要沿软弱夹层发展较快,说明边坡体中的软弱夹层对边坡稳定性极为不利,是加固的重点位置。

### (4) 边坡安全系数的变化

分析雨量为200 mm/d时安全系数的变化,在边坡位移分析的基础上,结合强度折减法(SRM),

分析不同降雨持续时间时的边坡安全系数的变化，见表 2 所示。

表 2 边坡安全系数变化情况  
Tab. 2 The changing of the slop safety factor

时刻/d	安全系数	时刻/d	安全系数
0	1.378	8	0.976
2	1.237		
4	1.106		
6	0.993	10(降雨停止 2 d)	0.965
		12(降雨停止 4 d)	1.024

由表 1 可知，受持续降雨的影响，边坡的安全系数不断减小，其值由降雨前的 1.378 降低为 0.965，降低了 29.97 %，引起边坡稳定状态的变化，边坡处于危险状态。

降雨结束后，由于地下水的蒸发与边坡潜在滑面以上地下水向边坡深部的渗流，边坡土体的孔隙水压力逐渐的消散，潜在滑面上的抗剪强度逐渐恢复，边坡的安全系数逐渐增达，边坡的稳定性逐渐增加(与实际情况相符)；但最终边坡的安全系数小于降雨前的安全系数，因此，在经历数次降雨循环后边坡的稳定状态将进一步恶化，如不进行加固处置，将可能造成高速公路路堤的滑塌失稳。

4 基于数值分析的边坡加固建议

4.1 加固方案比较

通过数值模拟分析，选取边坡位移最大的断面，分别采用锚索、抗滑桩进行路基边坡的加固处理；对两种措施的效果进行对比分析，确定最终的加固优化方案。

边坡的加固方案布置如图 6 所示，利用 MIDAS GTS NX 建立了加固优化分析数值模型见图 7 所示，分析降雨条件下锚索、抗滑桩加固路基边坡的稳定特性。边坡加固采用的锚索和抗滑桩材料的计算参数见表 3 所示。

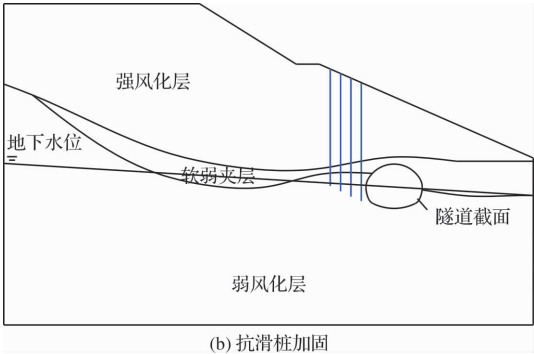
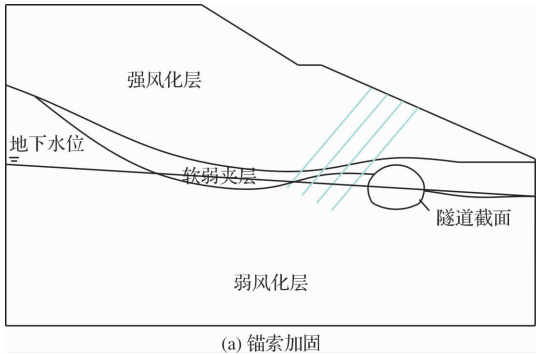


图 6 加固措施布置图

Fig. 6 Reinforcement measures plan

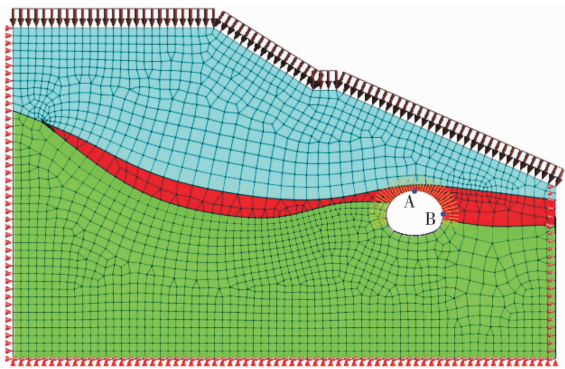


图 7 边坡加固模型

Fig. 7 Slope reinforcement model

表 3 锚索、抗滑桩力学参数

Tab. 3 The mechanics parameter of anchor cable and anti-slide piles

材料名称	$E$ /GPa	$\gamma$ /kN · m <sup>-3</sup>	$\mu$	截面积 /m <sup>2</sup>	长度 /m
锚索	31.5	25	0.25	0.02	24
抗滑桩	28	25	0.25	1	14.5

4.2 加固效果分析

考虑下穿隧道施工扰动影响下降雨入渗对边坡位移的影响，分析路堤边坡在原始状态、锚索加固和抗滑桩加固工况下的总位移、水平位移的变化情况，表 4 给出了三种工况下边坡中最大位移值的汇总情况；选取测点 A、B 分别测得边坡总位移与水平位移随降雨持续时间的变化情况，结果如图 8 所示。

表 4 各工况下边坡位移值比较分析

Tab. 4 Analysis of the displacement values of the slope under three conditions

比较项	原始边坡	锚索加固	抗滑桩加固
总位移/mm	48.62	29.72	38.14
相差百分比/%	—	38.87	21.56
水平位移/mm	29.92	22.31	25.56

续表 4

比较项	原始边坡	锚索加固	抗滑桩加固
相差百分比/%	—	25.43	14.57
垂直位移/mm	25.84	20.58	22.65
相差百分比/%	—	20.35	12.35

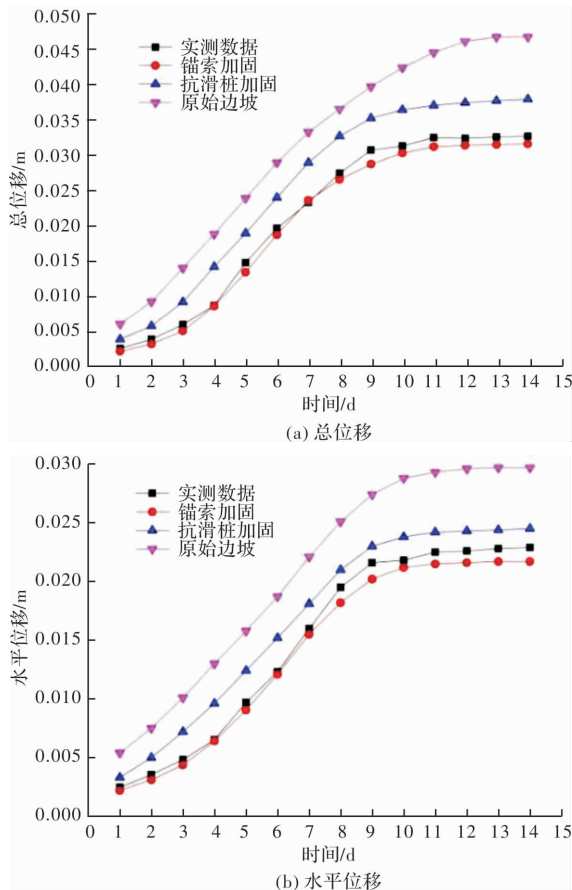


图8 各工况下边坡总位移、水平位移变化情况比较

Fig. 8 Comparison of total displacement、horizontal displacement of slope under three working conditions

由表3和图8给出的分析结果可知,在无加固条件下,原始边坡的位移随降雨的持续,位移值快速的增加,位移值的变化幅度较大;采用锚索或抗滑桩加固以后,边坡中的最大位移值明显降低,且随着降雨的持续,边坡中最大位移值的增加幅度较无加固时的变化幅度小。

与原始边坡相比,采用抗滑桩加固时,边坡中的最大位移值分别减小了21.56%和14.57%;在采用锚索加固工况下,总位移和水平位移的最大值分别减小了38.87%和25.43%。因此,两种方案均可有效的减小边坡的最大位移值,增加边坡的稳定性。

相对于无加固条件下的路堤边坡而言,两种加固措施下(锚索加固与抗滑桩加固),在整个降雨期间,受下穿隧道施工扰动边坡的最小安全系

数为1.240和1.160,较无加固条件下边坡的最小安全系数0.965提高了28.5%和20.2%。

基于以上分析,两种加固方式都能有效提高路堤边坡的稳定性;但从技术及人力等方面考虑,建议路堤边坡采用锚索加固方案。

跟踪现场路堤边坡锚索加固,对分析断面关键点的位移进行了现场监测,现场实测数据见图8中实测数据。对比分析可见,现场实测的边坡的总位移和水平位移介于两种加固方案时计算的位移之间,其值虽有所波动,但与锚索加固方案的计算值接近,且变化规律相似。因此,基于数值分析建议的路堤边坡的锚索加固方案合理、有效。

## 5 结论

依托贵阳轨道交通1号线下麦西地铁隧道下穿运营高速公路路基边坡工程的施工,采用数值模拟方法分析了降雨入渗条件下受隧道下穿扰动路基边坡的稳定特性,可得出以下的研究结论:

(1)考虑持续降雨的影响,下穿隧道扰动边坡中的孔隙压力变化明显,总体呈现负—正—负的变化。在降雨结束时,边坡上部的孔隙水压力由负变正,成为暂时的饱和区;随着降雨的进一步蒸发和潜在滑面以上土体地下水的下渗,滑面上的孔隙水压力减小,土体强度逐渐恢复,边坡的稳定性增加。但经历降雨影响后的边坡的安全系数低于原边坡的安全系数。

(2)随着降雨的持续,路堤边坡内部的软弱夹层位置的塑性区范围将逐渐增加,并最终形成沿软弱夹层贯通的滑移面,造成边坡沿软弱面的滑移破坏。因此,路堤边坡新老填筑面间的软弱夹层位置是边坡的潜在滑移面,对边坡的稳定十分不利。

(3)采取锚索与抗滑桩加固方案后,边坡安全系数增加;相比于无加固边坡,在整个降雨过程中,采用锚索加固方案时边坡的最小安全系数由0.965增加到1.240,提高了28.5%;采用抗滑桩加固方案时,整个降雨过程中边坡的最小安全系数增加到了1.160,提高了20.2%。因此,两种加固措施均可增加边坡稳定性,改善下穿路堤边坡隧道的受力状况。

## 参考文献 References

- [1] 郑俊杰,包德勇,龚彦峰,等.铁路隧道下穿既有高速公路隧道施工控制技术研究[J].铁道工程学报,2006(8):80-84.

- ZHENG Junjie, BAO Deyong, GONG Yanfeng, et al. Research on construction control technology for railway tunnel underneath passing existing expressway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(8):80-84.
- [2] 赵纪平. 超浅埋隧道下穿高速公路、国道施工技术研究[J]. 隧道建设, 2009, 29(4):441-445, 465.
- ZHAO Jiping. Research on construction technology for the ultra shallow buried tunnel underneath passing existing highway and nation road[J]. Tunnel Construction, 2009, 29(4):441-445, 465.
- [3] PEI Tian, XU Xinyi, PAN Chengzhong, et al. Impacts of rainfall and inflow on rill formation and erosion processes on steep hillslopes[J]. Journal of Hydrology, 2017, 548:24-29.
- [4] FAN Ping, LIU Qingquan, LI Jiachun, et al. Numerical analysis of rainfall infiltration in the slope with a fracture[J]. Science in China Series E: Engineering & Materials Science, 2005, 48(1):107-120.
- [5] 张社荣, 谭尧升, 王超, 等. 强降雨特性对饱和-非饱和和边坡失稳破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2):4102-4112.
- ZHANG Sherong, TAN Yaosheng, WANG Chao, et al. Effects of heavy rainfall on the instability and failure of saturated-unsaturated slope [J]. Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2014, 33 (S2): 4102-4112.
- [6] 荣冠, 王思敬, 王恩志, 等. 强降雨下元磨公路典型工程土坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 704-711.
- RONG Guan, WANG Sijing, WANG Enzhi, et al. Stability analysis of Yuanmo highway slope under intensive rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 704-711.
- [7] THOMAS H R, HE Y. Coupled heat-moisture transfer theory for deformable unsaturated soil and its algorithmic implementation[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40 (18): 3421-3441.
- [8] WONG T T, FREDLUND D G, KRAHN J. Numerical study of coupled consolidation in unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35 (6): 926-937.
- [9] 张延军, 王恩志, 王思敬. 非饱和土中的流-固耦合研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 999-1004.
- ZHANG Yanjun, WANG Enzhi, WANG Sijing. Study for fluid-solid coupling process in unsaturated soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (6): 999-1004.
- [10] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear Strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [11] ANR, WANG X. Discontinuous Galerkin finite element method for plate contact problem with frictional boundary conditions[J]. Journal of Numerical Mathematics, 2014, 22(3):177-190.
- [12] CHO S E, LEE S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(3):185-208.
- [13] 谭晓慧, 王建国. 边坡的弹塑性有限元可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 44-50.
- TAN Xiaohui, WANG Jianguo. Slope reliability analysis using elasto-plastic finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (1): 44-50.
- [14] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等. 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. CHEN Zhongyi, ZHANG Zaiming, CHEN Yujiong, et al, Translated. Beijing: China Building Industry Press, 1997.

(编辑 沈 波)