

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0213

## 暴雨作用下山区农村公路路基滑塌实例分析

周佳辉<sup>1</sup>, 陈月松<sup>2</sup>, 丁勇<sup>1\*</sup>, 陈帝江<sup>2</sup>, 熊群<sup>1</sup>, 袁家琛<sup>1</sup>, 石林泽<sup>1</sup>

(1. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市公路与运输管理中心, 浙江 宁波 315040)

**摘要:** 强降雨作用下, 公路路基容易发生滑塌灾害, 不仅造成结构物与车辆的财产损失, 而且会产生严重的人员伤亡。以宁波市“812”暴雨中山区农村公路的路基边坡滑塌实例为研究对象, 将渗流与应力耦合的有限元方法和强度折减法相结合, 模拟了该路基边坡在暴雨下的土体渗流、变形与应变情况, 分析了边坡稳定系数的变化规律, 再现了路基边坡在暴雨条件下发生滑塌的过程, 模拟得到的圆弧滑移面与实际滑移面一致, 且有限元模拟得到的塑性区贯通时间与实际滑塌都发生在暴雨第一天。结果表明: (1) “812”暴雨中的雨水入渗导致路基边坡的土体饱和度升高, 孔隙水压力增大, 坡顶和坡脚的基质吸力分别下降了 62.3% 和 47.0%, 土体抗剪强度降低而发生软化; (2) 路基边坡的坡脚首先出现塑性变形并向上发展, 特大暴雨持续 17.43 h 后塑性区出现贯通现象, 最终导致沿着滑移面的整体滑塌, 这揭示了路基边坡的滑塌机理; (3) 暴雨中路基边坡的稳定系数由 1.16 降至 0.93, 因此已处于不稳定状态, 可以通过预测瞬态的稳定系数对边坡滑塌进行及时预警。

**关键词:** 山区农村公路; 降雨入渗; 路基边坡滑塌; 强度折减法; 有限元模拟; 实例分析

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2025) 05-0064-08

近年来, 公路路基边坡在台风、暴雨等自然灾害下的滑塌事故频发, 不仅造成了结构物与车辆的财产损失, 而且产生了严重的人员伤亡<sup>[1]</sup>。2024 年 5 月 1 日, 广东梅大高速公路在暴雨后发生路基边坡滑塌, 造成 48 人死亡, 30 人受伤<sup>[2]</sup>。次日, 国务院印发紧急通知, 要求全国各省市区强化突发事件灾害应对处置的能力, 坚决防范类似灾害事故发生<sup>[3]</sup>。宁波市位于东南沿海地区, 夏季台风、暴雨频发, 且山区多, 山区农村公路多为技术等级较低的三、四级公路, 在暴雨的影响下, 公路边坡易发生滑塌等地质灾害, 严重威胁交通安全。因此, 开展降雨作用下的路基边坡稳定性研究, 对以宁波为代表的东南沿海山区的农村公路防灾减灾有重要的理论和现实意义。

现有降雨入渗下的边坡稳定性分析主要包括理论分析与试验研究<sup>[4-6]</sup>。理论分析包含理论解析

法与数值仿真法。在研究的早期多采用经典的边坡稳定性理论, 如极限平衡法<sup>[7-8]</sup>等。其中 Coulomb<sup>[9]</sup>提出的土体强度理论为稳定性分析奠定了重要基础, 后来 Bishop 等<sup>[10]</sup>通过引入等效孔隙压力概念, 成功推导出适用于非饱和土体的有效应力强度公式, 推动了土力学理论的发展进程。随着计算机技术的发展, 越来越多的研究者采用有限元法<sup>[11-12]</sup>、有限差分法<sup>[13]</sup>等数值方法, 结合土-水耦合模型, 模拟降雨入渗过程中的渗流与边坡稳定性变化。Zienkiewicz 等<sup>[14]</sup>提出了基于强度折减法的路基边坡稳定性计算方法, 为使用有限元方法处理路基边坡稳定性等相关问题提供了理论依据。Ren 等<sup>[15]</sup>对不同降雨入渗深度下的边坡变形进行了数值模拟, 并采用强度折减法分析了降雨入渗深度对路堤边坡稳定性的影响规律。试验研究主要通过室内试验或现场试验来模拟降雨入渗过程, 观察水分运

收稿日期: 2025-02-25

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LTGS24E080002); 浙江省交通运输厅揭榜挂帅科技计划项目; 浙江省教育厅一般科研项目(Y202455432)

第一作者: 周佳辉, 硕士研究生, 主要研究方向为桥梁与道路工程。E-mail: zhoujiahui0423@163.com

\*通信作者: 丁勇, 教授, 主要研究方向为桥梁与道路工程。E-mail: dingyong@nbu.edu.cn

动、渗流特性及其对坡体稳定性的影响<sup>[16-17]</sup>。例如, Tao 等<sup>[18]</sup>通过现场实测,研究了降雨作用下边坡不同深度的土壤含水量,量化了重塑土的土-水特征曲线和饱和渗透系数。Yin 等<sup>[19]</sup>通过物理模型试验,探讨了降雨入渗下土质边坡稳定性的影响因素和力学性质。齐向阳等<sup>[20]</sup>基于相似原理的边坡缩尺模型,开展了不同降雨强度和历时下的边坡试验,通过对边坡降雨全过程监测,分析不同降雨条件对边坡稳定性的影响。

综上所述,尽管国内外学者关于边坡稳定性的研究取得了许多成果,但相较于公路上方的边坡,针对公路下方的路基边坡稳定性研究还很少。与公路上方的边坡相比,路基边坡的顶部为混凝土或沥青路面,渗透系数很小,侧面坡度则较大,雨水入渗较慢;但是,路基边坡一旦坍塌,将危及车辆与行人安全,且比上方边坡的滑坡更不容易被注意到,后果更加严重。因此,本文通过对宁波市“812”暴雨中山区农村公路路基边坡滑塌实例进行研究,将渗流与应力耦合的有限元方法和强度折减法相结合,分析了实例路基边坡滑塌的整个过程,并由此获得了事故路基在暴雨期间的瞬态渗流场、位移场和整体稳定系数,研究结果可为山区公路的路基滑塌防治提供理论基础,为实时的灾害监测提供预警阈值。

## 1 路基边坡滑塌实例

研究分析的路基边坡滑塌实例为细北线 K0+900 路基边坡,其位于浙江省宁波市海曙区章水镇。细北线为低山丘陵地带的四级公路,地质条件主要由填土、含黏性土碎砾石和基岩组成,于 2003 年建成通车,至今运营已超 20 a,近年来水毁现象频发,对人民生命财产安全造成重大影响。2021 年 8 月 12 日,受弱冷空气和西南暖湿气流共同影响,海曙区出现了连续的降雨过程,历时 5 d,局部山区出现特大暴雨(以下称为“812”暴雨)<sup>[21]</sup>。受极端强降雨天气影响,细北线 K0+895—K0+930 处路基边坡发生失稳滑塌,滑移面呈圆弧状,滑塌路段长约 35 m,由于山区路段交通量较少,直到 8 月 13 日才发现滑坡,未记录滑坡的具体时间及过程,但可以确认滑坡在强降雨的首日发生,现场照片如图 1 所示。



图1 路基边坡滑塌实例

“812”暴雨期间,海曙区章水镇局部最大降雨强度为 20 mm/h,24 h 内降雨量超过 300 mm,根据国家降雨强度划分标准<sup>[22]</sup>,属于特大暴雨级别。根据国家气象信息中心数据,“812”暴雨期间 24 h 内降雨量和降雨等级变化见表 1。

表1 “812”暴雨期间的降雨状况

| 日期    | 降雨量/mm | 峰值强度/(mm·h <sup>-1</sup> ) | 降雨等级 |
|-------|--------|----------------------------|------|
| 8月12日 | 330    | 20                         | 特大暴雨 |
| 8月13日 | 24     | 1                          | 中雨   |
| 8月14日 | 48     | 2                          | 大雨   |
| 8月15日 | 24     | 1                          | 中雨   |
| 8月16日 | 48     | 2                          | 大雨   |

降雨强度是影响该路基边坡滑塌的主要因素。已知 8 月 12 日最大降雨强度为 20 mm/h,总降雨量为 330 mm,整体呈现出逐渐增大然后逐渐减小的分布规律,即在降雨开始和结束时强度较低,而在中间阶段达到最大值,符合峰型降雨的特征<sup>[23]</sup>。考虑到滑坡地点没有记录每小时的降雨强度,将该峰型降雨假设为二次抛物线的形状,即在理论计算中,假设“812”暴雨前 24 h 阶段的降雨强度( $q$ )为随时间( $t$ ,单位 h)连续变化的二次函数:

$$q = -0.13(t-12)^2 + 20 \quad (1)$$

24 h 后的降雨形式采用均匀降雨,由此可得“812”暴雨的降雨强度时程曲线,如图 2 所示。

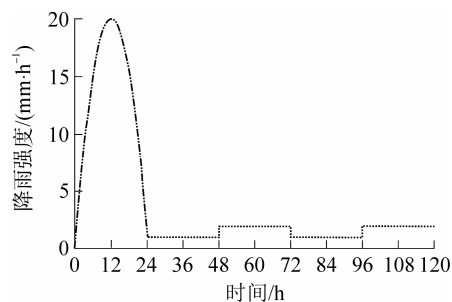


图2 “812”暴雨的降雨时程

## 2 渗流与稳定性分析原理

### 2.1 渗流-应力耦合有限元方程

在降雨入渗作用下,路基边坡会产生土体渗流过程,渗流过程与土体饱和度、渗透系数等性质有关,可推导得到土体的非稳定渗流有限元方程;土体又在重力、孔隙水压力、外部作用力等作用下处于力学平衡状态,也可推导得到土体的力学平衡有限元方程。因此,路基边坡土体的饱和-非饱和渗流-应力耦合有限元方程为

$$\begin{cases} H\mathbf{u}_w + \mathbf{S}_p \frac{\partial \mathbf{u}_w}{\partial t} = \mathbf{f}_p \\ \mathbf{K}_l \boldsymbol{\alpha} + \mathbf{K}' \mathbf{u}_w = \mathbf{F} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{H}$  为渗透矩阵;  $\mathbf{u}_w$  为孔隙水压力向量;  $\mathbf{S}_p$  为压缩矩阵;  $\mathbf{f}_p$  为流体力向量;  $\mathbf{K}_l$  为节点位移对应的单元刚度矩阵集合而成的结构整体刚度矩阵;  $\boldsymbol{\alpha}$  为节点位移向量;  $\mathbf{K}'$  为节点孔隙水压力对应的单元刚度矩阵集合而成的结构整体孔隙水压力刚度矩阵;  $\mathbf{F}$  为结构整体节点荷载向量。结合土体本构方程求解方程组(2),即可得到土体节点位移和相应的孔隙水压力。

### 2.2 降雨入渗模型

路基土体降雨入渗采用 Alonso 渗透模型<sup>[24]</sup>,该渗透模型能够反映非饱和土体渗透系数、饱和度随基质吸力的变化关系,能在有限元分析中较好地模拟非饱和土体在降雨入渗影响下的渗流情况。

$$k_w = \frac{a_w k_{ws}}{a_w + (b_w + (u_a - u_w))^{c_w}} \quad (3)$$

式中:  $k_w$  为非饱和土渗透系数;  $k_{ws}$  为土的饱和渗透系数;  $u_a$  为孔隙气压力;  $u_w$  为孔隙水压力;  $a_w$ 、 $b_w$ 、 $c_w$  为材料系数,分别取 1 000、0.01 和 1.7<sup>[25]</sup>。

$$S_r = S_i + \frac{(S_n - S_i)a_s}{a_s + (b_s + (u_a - u_w))^{c_s}} \quad (4)$$

式中:  $S_r$  为饱和度;  $S_i$  为残余饱和度;  $S_n$  为最大饱和度;  $a_s$ 、 $b_s$ 、 $c_s$  为材料系数,分别取 1、 $5 \times 10^{-5}$  和 3.5<sup>[25]</sup>。

式(3)定义了渗透系数和基质吸力之间的关系,式(4)定义了饱和度与基质吸力之间的关系。

### 2.3 非饱和土的强度理论

根据沙土的摩擦实验, Coulomb<sup>[9]</sup>提出土体的强度理论, Mohr-Coulomb 准则的一般表达式为

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

式中:  $\tau_f$  为破坏面上的剪应力;  $c$  为土的黏聚力;  $\sigma$  为破坏面上的总法向应力;  $\varphi$  为土的摩擦角。

Bishop 等<sup>[10]</sup>基于 Mohr-Coulomb 准则,引入了等效孔隙压力,推导了非饱和土体的有效应力强度公式:

$$\tau_f = c + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi \quad (6)$$

式中:  $\chi$  为与土体饱和度相关的参数,在有限元分析中,  $\chi$  可简化为土体饱和度  $S_r$ , 因此对于饱和土体,取  $\chi = 1$ , 对于完全干燥土体,取  $\chi = 0$ 。

由式(6)可知,非饱和土的抗剪强度会随基质吸力( $u_a - u_w$ )的降低而减弱,因此可以通过基质吸力来反映边坡土体的抗剪强度,从而分析渗流作用对路基边坡稳定性的影响。

### 2.4 强度折减法

将强度折减法<sup>[14]</sup>与有限元方法相结合,进行边坡的稳定性分析,其基本原理是将边坡土体的强度参数(黏聚力和内摩擦角)同时除以一个折减系数  $F_s$ , 改变路基边坡的抗剪强度,并通过调整  $F_s$ , 求得边坡极限状态下的稳定系数。当边坡土体处于极限平衡状态时,强度折减系数与传统的边坡整体稳定系数意义相同。引入强度折减系数后的抗剪强度参数计算公式为

$$c' = c / F_s \quad (7)$$

$$\varphi' = \arctan[(\tan \varphi) / F_s] \quad (8)$$

式中:  $c'$  为折减后的土体黏聚力;  $\varphi'$  为折减后的土体摩擦角。

基于强度折减法分析边坡是否达到临界破坏的失稳评价准则有三种:(1)模型计算是否收敛;(2)特征部位是否发生位移突变;(3)滑移土体是否形成连续的塑性贯通区。由于强度折减造成以上情形时,认为路基边坡发生剪切破坏,达到临界状态,此时的强度折减系数即为边坡的稳定系数。

## 3 实例路基边坡的渗流与稳定性分析

### 3.1 有限元模型构建

采用有限元方法对细北线的滑塌路基边坡进行建模分析,由现场勘探数据可知,细北线 K0+900 处路基边坡高 8 m,边坡坡度为 1:0.2。有限元计算模型长为 35 m,宽为 15.6 m,高为 18.35 m,如图 3、图 4 所示。根据地质勘测报告,在滑塌地点附

近钻孔取芯获得样本, 再进行室内试验, 获取了不同土层的物理力学性质, 该路基边坡高度方向的分层参数见表 2。有限元建模分析采用 ABAQUS 软件。有限元分析中, 边坡土体采用六面体单元建模, 单元类型选用编号为 C3D8P 的孔隙流体与应力计算单元, 单元数量为 36 076 个, 材料的计算模型采用 Mohr-Coulomb 本构模型。

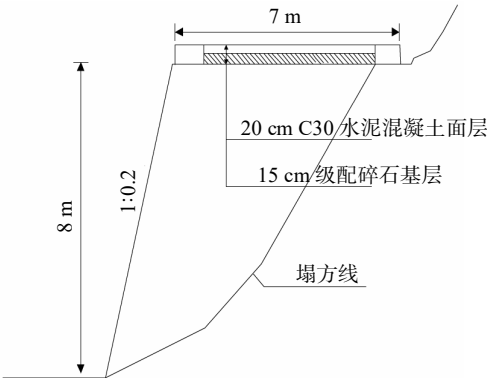


图 3 滑塌的路基边坡剖面图

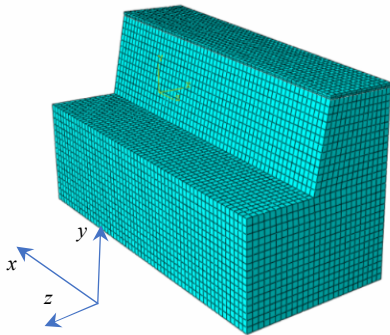


图 4 路基边坡的有限元模型

表 2 路基边坡的各层参数

| 结构层 | 厚度/<br>m | 弹性模<br>量/MPa | 泊松<br>比 | $\varphi/(^{\circ})$ | $c/\text{kPa}$ | 密度/<br>( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | $k_{\text{ws}}/(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$ |
|-----|----------|--------------|---------|----------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|
| 面层  | 0.20     | 30 000       | 0.20    | 54.9                 | 3.18           | 2.63                                    | $3.6\times 10^{-8}$                          |
| 基层  | 0.15     | 1 500        | 0.25    | 36.0                 | —              | 1.65                                    | $3.6\times 10^{-1}$                          |
| 路基  | 8.00     | 50           | 0.27    | 24.2                 | 11.00          | 1.66                                    | $1.8\times 10^{-2}$                          |
| 地基  | 10.00    | 50           | 0.27    | 31.6                 | 15.00          | 1.48                                    | $1.6\times 10^{-2}$                          |

3.1.1 表面孔隙流边界条件

通过在边坡表面施加一个面力(压力)来模拟降雨, 由于边坡存在一定坡度, 在实际的降雨过程中, 坡面所承受的降雨荷载并非均匀作用于坡面, 而是受到坡度的影响。因此, 在表面孔隙流中设置坡顶降雨边界函数为  $q$ , 坡面降雨边界函数为

$q\cos\alpha$ , 其中  $\alpha$  为边坡坡度。又由于降雨强度不是恒定的, 因此定义其为随时间变化的函数。最后为模拟降雨的时间历程, 在分析步中还需要定义降雨的总时长为 120 h。

3.1.2 孔压边界条件

根据水文地质勘测报告, 细北线路段地下水位埋深为 2 m。假定地层分界线水平, 地下水位线水平, 调用空间分布函数来定义地下水位线以下孔压边界条件: 地下水位线处孔压为零, 为排水边界, 地下水位线以下的静水孔压( $\sigma_c$ )由浅至深呈线性递增, 呈现式(9)所示的分布规律, 其余边界默认为不排水边界。

$$\sigma_c = \gamma \cdot z \tag{9}$$

式中:  $\gamma$  为水的重度;  $z$  为由地下水位线算起至该点的深度。

3.1.3 位移边界条件

在计算模型的  $x$  轴方向(路面横向)上, 路基边坡的坡面为自由面, 其余约束  $x$  轴和  $z$  轴方向(路面纵向)的位移, 即  $U_1=U_3=0$ ;  $y$  轴方向(高度方向)上, 模型底面设置为完全固定, 其余为自由面;  $z$  轴方向上, 模型横断面处约束  $x$  轴和  $z$  轴方向的位移, 即  $U_1=U_3=0$ 。

3.2 路基边坡渗流分析

对上述路基边坡进行有限元计算, 结果表明, 在“812”暴雨过程中, 路基边坡由于长时间的雨水入渗, 土体内部饱和度和孔隙水压力升高, 降雨 120 h 后的饱和度和孔隙水压力分布如图 5、图 6 所示。由图可知, 路基边坡的坡脚土体饱和度和孔隙水压力分布最不均匀, 而在坡体上部和地面深部的同一高度上大小近似。

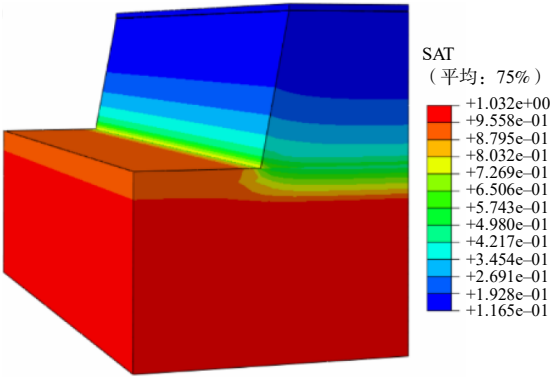


图 5 降雨 120 h 后土体饱和度分布

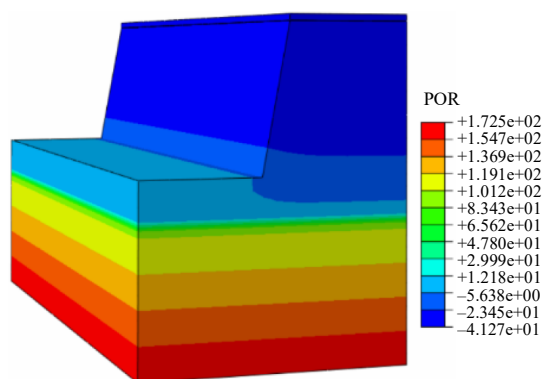


图6 降雨120 h后土体孔隙水压力分布

图7、图8分别为饱和度、基质吸力随降雨时长的变化规律。由图可知,前24 h特大暴雨期间,坡顶和坡脚饱和度均持续增大,由于土体含水率升高,坡顶和坡脚处的孔隙水压力逐渐增大,基质吸力逐渐减小,坡顶由100 kPa下降到37.7 kPa,下降了62.3%,坡脚由20 kPa下降到10.6 kPa,下降了47.0%。坡顶处的基质吸力变化速率明显快于坡脚,这是由于雨水从坡顶开始入渗,坡顶处饱和度较低的非饱和土体含水率快速升高,导致坡顶处基质吸力变化幅度更快;随着降雨持续,坡顶处的孔隙水压力逐渐和坡脚接近,且增大的速度减缓。

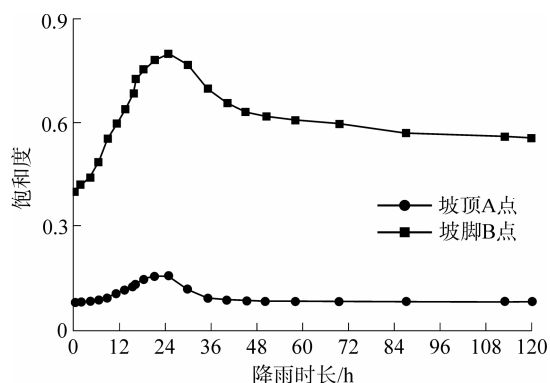


图7 饱和度随降雨时长的变化规律

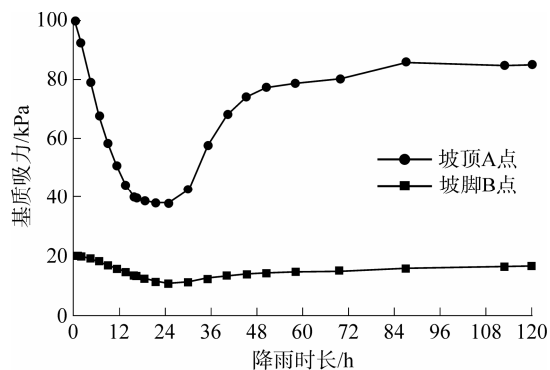


图8 基质吸力随降雨时长的变化规律

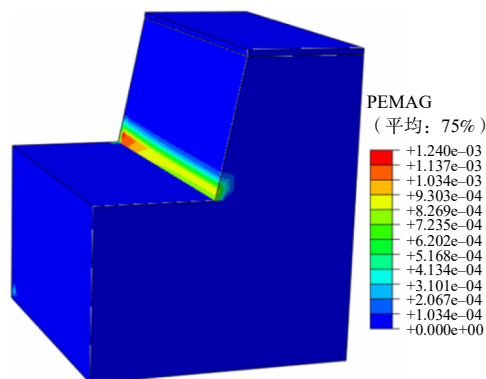
基质吸力是影响土体抗剪强度的重要因素,随着降雨的持续,坡顶和坡脚的基质吸力逐渐减小。由式(6)可知,基质吸力的减小会降低土体的抗剪强度,使得边坡的稳定性下降。由图8可知,降雨24 h坡顶的基质吸力仍大于坡脚,故坡脚土体的抗剪强度低于坡顶,且坡脚承受的上部压力也更大,因此可推测坡脚土体会先发生滑塌。

降雨24~120 h期间,随着降雨强度降低,坡顶和坡脚处的饱和度均有所下降,坡顶基质吸力又逐渐增大,但坡脚处基质吸力变化并不明显,同时地下水位线相较初始状态明显上升,说明此时的人渗速率小于下渗速率,雨水快速下渗至地下,补充地下水。

### 3.3 路基边坡应变与位移分析

渗流与应力耦合的有限元计算也获得了路基边坡的位移与应变。因为考虑了土体的弹塑性本构关系,所以能模拟边坡的失稳过程及滑移面形状,并根据路基边坡是否形成连贯的塑性贯通区来判定边坡是否达到临界破坏。为简化计算,不考虑降雨时部分雨水因无法入渗而形成地表径流的情况,认为雨水全部下渗。

通过有限元模拟,得到“812”暴雨时路基边坡在 $t=3.88$  h和 $t=17.43$  h时的土体塑性应变(PEMAG)云图,如图9所示。图9中可以清晰地看到边坡塑性区变化的过程,路基边坡从坡脚开始发生塑性应变,产生塑性应变区,并逐渐沿滑动面向上延伸,当 $t=17.43$  h时塑性区出现贯通现象,说明此时路基边坡沿滑动面出现滑动的趋势,达到临界破坏状态。图9中模拟得到的圆弧滑移面与图1中实际滑塌面位置和形状基本一致,且滑移面贯通时间与实际滑坡都发生在暴雨的第一天。

(a)  $t=3.88$  h时的塑性区

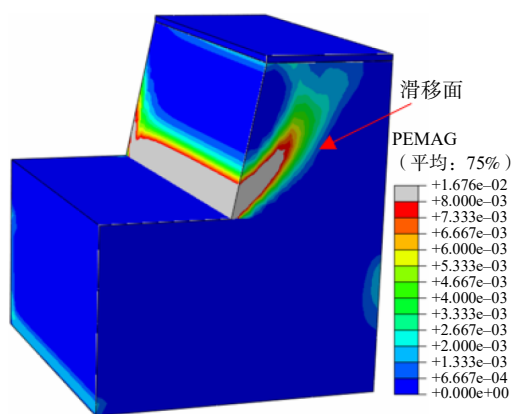
(b)  $t=17.43$  h 时的塑性区

图9 塑性应变云图

图10显示了降雨120h后的路基边坡水平位移的分布云图,由图可知最大水平位移发生在坡脚处,证明了坡脚土体会先发生滑塌的猜测是成立的,也和近年来的边坡滑塌位移研究结果一致<sup>[26]</sup>。由地应力平衡产生的坡脚位移为15.8 mm,在120h降雨下产生的位移为6.5 mm,因此图10中的坡脚水平位移约为22.3 mm。

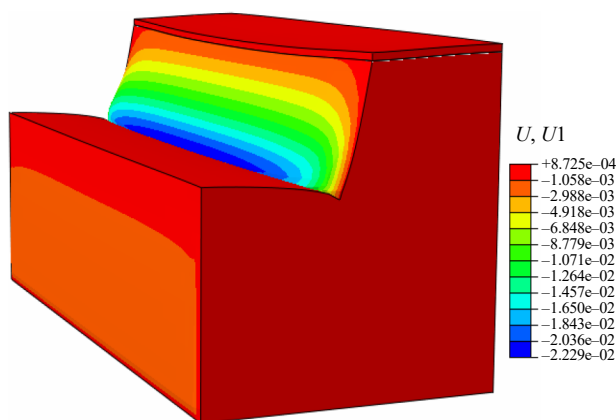


图10 边坡水平位移分布云图(放大70倍)

图11为“812”暴雨期间降雨入渗引起的路基边坡坡脚水平位移随时间变化的曲线,该曲线的变化规律与学界公认的斋藤模型<sup>[27]</sup>,即边坡位移特征曲线变化规律相一致,总体呈现出初始变形、等速变形和加速变形三个阶段。由图11可知,坡脚处的水平位移发生突变的时间,与路基边坡出现塑性贯通区的时间相近,都为特大暴雨持续17.43 h时,此时的坡脚水平位移为1.7 mm。在不发生滑塌的前提下,本次暴雨导致的坡脚最大水平位移约为6.5 mm。上述计算结果可以为路基边坡监测时的滑塌预警阈值研究提供参考。

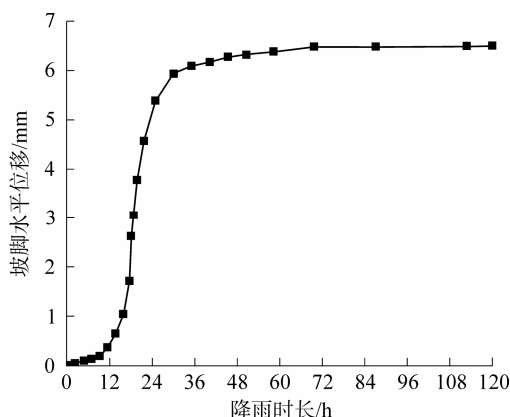


图11 “812”暴雨中的坡脚水平位移变化

### 3.4 路基边坡稳定系数计算

将强度折减法与有限元方法相结合,分析路基边坡的稳定系数,得到“812”暴雨作用下的稳定系数变化规律,如图12所示。滑坡防治工程勘察规范<sup>[28]</sup>规定,稳定系数大于等于1.15的边坡属于稳定状态;稳定系数大于等于1.05小于1.15的边坡属于基本稳定状态;稳定系数大于等于1小于1.05的边坡属于欠稳定状态;稳定系数小于1的边坡属于不稳定状态。

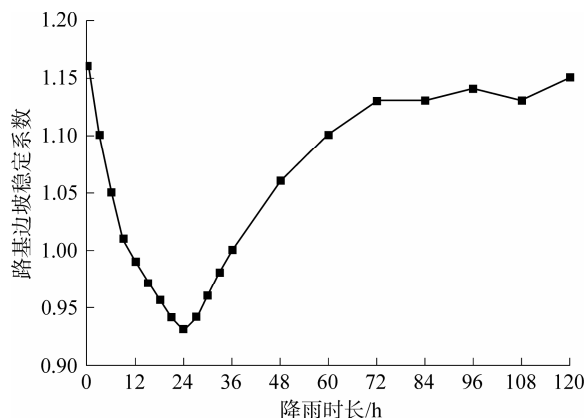


图12 “812”暴雨时路基边坡稳定系数变化规律

由图12可知,“812”暴雨前,细北线K0+900路基边坡的稳定系数为1.16,此时处于稳定状态;0~24h的特大暴雨期间,随着降雨入渗,该路基边坡的稳定系数逐渐降低,24h后的稳定系数降至最低,这是因为前24h降雨入渗的速率大于雨水下渗的速率,最低的路基边坡稳定系数为0.93,说明边坡处于不稳定状态,降雨已严重削弱了边坡的稳定性,路基存在滑塌风险;在降雨24~120h期间,降雨量相对较小,边坡的稳定系数逐渐回升,直至恢复到稳定状态。

## 4 结论

将渗流与应力耦合的有限元方法和强度折减法相结合,实现了对暴雨作用下宁波市典型山区公路路基边坡滑塌事故的准确模拟,得到了瞬态的稳定系数,为路基边坡的滑塌预防与报警提供了分析方法与案例。研究结论如下:

(1)“812”暴雨作用下,细北线 K0+900 路基边坡的土体饱和度快速升高,孔隙水压力不断增大,基质吸力逐渐下降,坡顶和坡脚的基质吸力分别下降了 62.3%和 47.0%,抗剪强度降低,从而使边坡土体发生软化。

(2)当降雨持续 3.88 h 时路基边坡从坡脚开始发生塑性变形,产生塑性应变区,并逐渐沿滑动面向上延伸,当降雨持续 17.43 h 时塑性区出现贯通现象,达到滑塌临界状态,此时的坡脚水平位移为 1.7 mm,该位移可以为实例路基滑坡监测的预警阈值设定提供参考。

(3)通过强度折减法计算得到细北线 K0+900 路基边坡在“812”暴雨下稳定系数的变化情况,降雨前的稳定系数为 1.16,降雨 24 h 后稳定系数降为 0.93,边坡处于不稳定状态,这表明强降雨会使边坡稳定系数快速下降,在实际工程中可以利用稳定系数的预测对边坡滑塌进行及时预警。

## 参考文献:

- [1] WANG W T, MA S Y, YAN W J, et al. The spatial distribution characteristics and possible influencing factors of landslide disasters in the Zhaotong area, Yunnan province of China[J]. *Applied sciences*, 2024, 14(12):5093.
- [2] 广东省应急管理厅. 梅大高速茶阳路段“5·1”塌方灾害调查评估报告[R]. 广州: 广东省应急管理厅, 2025.
- [3] 国务院安委会办公室. 认真贯彻落实习近平总书记重要指示精神 部署做好当前安全防范工作 坚决遏制重大事故灾害发生[EB/OL]. [2024-05-02]. [https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202405/t20240502\\_486799.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202405/t20240502_486799.shtml).
- [4] WANG Y, YE F, LI Y J, et al. Seepage response along with fine particle migration of a loose soil slope under rainfall infiltration[J]. *International journal of geomechanics*, 2025, 25(1):04024327.
- [5] LI C, ZHANG R T, ZHU J B, et al. Model test study on response of weathered rock slope to rainfall infiltration under different conditions[J]. *Journal of earth science*, 2024, 35(4):1316-1333.
- [6] ZHENG Y W, WU H, LUAN X H, et al. Numerical simulation of rainfall-induced deformations of embankments considering the coupled hydro-mechanical behavior of unsaturated soils[J]. *Computers and geotechnics*, 2024, 175:106714.
- [7] 郑颖人, 赵尚毅, 时卫民, 等. 边坡稳定分析的一些进展[J]. *地下空间*, 2001(4):262-271, 337-338.
- [8] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. *岩土工程学报*, 2001(5):525-529.
- [9] Coulomb C A. Essai sur une application des règles de maximis & minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture[M]. Paris: Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 1773:343-382.
- [10] Bishop A W, Alpan I, Blight G E, et al. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils[C]//Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder, Colorado: American Society of Civil Engineers, 1960:503-516.
- [11] LIU S Y, SU Z N, LI M, et al. Slope stability analysis using elastic finite element stress fields[J]. *Engineering geology*, 2020, 273:105673.
- [12] LIU F M. Stability analysis of geotechnical slope based on strength reduction method[J]. *Geotechnical and geological engineering*, 2020, 38(4):3653-3665.
- [13] ZHANG G R, LU G Y, XIA C Z, et al. A time-scale varying finite difference method for analyzing the influence of rainfall and water level on the stability of a bank slope[J]. *Applied sciences*, 2023, 13(9):5268.
- [14] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. *Géotechnique*, 1975, 25(4):671-689.
- [15] REN Y Q, CHEN X M, SHANG Y. Study on the influence of rainfall infiltration on the stability of dump slope[J]. *Desalination and water treatment*, 2024, 319: 100492.
- [16] YANG Z A, LIU X, QIAN W M, et al. Investigation of steep waste dump slope stability of iron ore mine: a case study[J]. *Applied sciences*, 2024, 14(8):3430.
- [17] BOURI D E, BELABBACI Z, BELHASSENA F Z, et al. Experimental and numerical analysis of reinforced landslide in static and dynamic conditions[EB/OL]. [2024-11-26]. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09727-7>.
- [18] TAO W B, WEN Y W, BIAN X, et al. Analysis of ecological prevention and control technology for

- expansive soil slope[J]. *Frontiers in earth science*, 2024, 12:1453178.
- [19] YIN L, HUANG C S, HAO S R, et al. Experimental study on the stability of shallow landslides in residual soil[J]. *Water*, 2023, 15(21):3732.
- [20] 齐向阳, 苏成, 宋宏芳, 等. 降雨入渗下强风化泥岩高边坡失稳模型试验研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2024, 41(6):18-24.
- [21] 宁波市水利局. 2021 年宁波市水情年报[R]. 宁波: 宁波市水利局, 2022.
- [22] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 降水量等级: GB/T 28592—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [23] 孙靖皓. 降雨对土-岩边坡渗流场和稳定性的影响及加固优化[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
- [24] Alonso E, Gens A, Lloret A, et al. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[C]//*Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils*. Paris, 1995, 1:241-249.
- [25] CHO S E, LEE S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. *Computers and geotechnics*, 2001, 28(3):185-208.
- [26] QU M L, DANG F N. Numerical analysis of instability mechanism of a high slope under excavation unloading and rainfall[J]. *Applied sciences*, 2022, 12(16):7990.
- [27] ZHANG J B, XIE L F, LIU X J, et al. Study on deformation evolution characteristics of reverse-dip rock slope under the influence of rainfall[J]. *Advances in civil engineering*, 2021, 2021(1):8789588.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 滑坡防治工程勘查规范: GB/T 32864—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

## A case study of roadbed slope collapse on rural road in mountainous area under heavy rainfall

ZHOU Jiahui<sup>1</sup>, CHEN Yuesong<sup>2</sup>, DING Yong<sup>1</sup>, CHEN Dijiang<sup>2</sup>, XIONG Qun<sup>1</sup>, YUAN Jiachen<sup>1</sup>, SHI Linze<sup>1</sup>  
( 1.College of Civil & Environmental Engineering and Geographical Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;  
2.Highway and Transportation Management Center of Ningbo, Ningbo 315040, China )

**Abstract:** Under the action of heavy rainfall, highway roadbeds are prone to landslide disasters, which not only cause property losses of structures and vehicles, but also produce serious casualties. This paper takes the landslide case of the roadbed slope of a rural road in the mountainous area of Ningbo City in the “812” rainstorm as the research object, combines the finite element method of seepage and stress that is coupled with the strength reduction method, simulates the seepage, deformation and strain of the soil body of this roadbed slope, analyzes the change rule of the stability coefficient of the slope, and reproduces the process of landslide under the heavy rainfall. The simulated circular landslide surface is consistent with the actual landslide surface, and the penetration time of the shaped zone obtained by finite element simulation is the same as that of the actual landslide on the first day of the rainstorm. The results show that: (1) The infiltration of rainwater in the “812” rainstorm led to the increase of soil saturation and pore water pressure, and the suction of the substrate at the top and foot of the slope decreased by 62.3% and 47.0%, respectively, and the softening occurred due to the decrease of the shear strength of the soil body; (2) The foot of the roadbed slope firstly showed plastic deformation and developed upward, and the plastic zone appeared to penetrate after 17.43 h of the heavy rainstorm, which finally led to the overall landslide along the slip surface, revealing the landslide mechanism of the roadbed slope; (3) The stability coefficient of the roadbed slope was reduced from 1.16 to 0.93 during the rainstorm, and thus was in an unstable state, and the transient stability coefficient could be predicted to give timely warning of the sliding of the slope.

**Keywords:** rural road in mountainous area; rainfall infiltration; roadbed slope collapse; strength reduction method; finite element simulation; case study

(责任编辑 韩超)