

# 降雨及地震作用下高边坡安全性数值模拟

韩昭玉, 瞿生军, 史冠宇

(江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225000)

**摘要:**为研究降雨及地震同时作用下公路边坡的稳定性响应机理,以某高边坡为工程背景,采用岩土模拟软件 GeoStudio 分析在降雨及地震耦合作用下的边坡稳定性。结果表明:1)当降雨强度为 75、150 mm/d 时,边坡最小平均安全系数分别为 0.813、0.854;2)当地震加速度为 0.2g、0.4g 时,边坡最小平均安全系数分别为 0.786、0.804;3)地震作用下边坡经历弹性变形、裂缝扩张及非线性变形 3 个阶段;4)雨水入渗导致表层岩土体抗剪强度降低以及地震动荷载造成的边坡内部岩土体开裂是边坡稳定性下降的主要原因,实际工程中应注意边坡的日常监测及防护。本文成果可为类似公路高边坡工程的日常灾害防治提供一点借鉴。

**关键词:**公路高边坡;地震;降雨;稳定性;数值模拟;失稳机理

**中图分类号:**U416.1<sup>+</sup>4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-8993(2024)11-0040-06

**doi:**10.13402/j.gcjs.2024.11.147

## Numerical simulation of high slope safety under rainfall and earthquake

HAN ZhaoYu, QU Shengjun, SHI Guanyu

(Jiangsu Engineering Survey and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to research the stability response mechanism of highway slope under the simultaneous action of rainfall and earthquake, the geotechnical simulation software GeoStudio is used to analyze the slope stability under the coupling of rainfall and earthquake with a high slope as the engineering background. The results show that: 1) When the rainfall intensity is 75 and 150 mm/d, the minimum average safety factor of the slope is 0.813 and 0.854, respectively; 2) When the seismic acceleration is 0.2g and 0.4g, the minimum average safety factor of the slope is 0.786 and 0.804, respectively; 3) Under the action of earthquake, the slope undergoes three stages: elastic deformation, crack expansion and nonlinear deformation. 4) The main reason for the decline of slope stability is the reduction of the shear strength of the surface rock and soil caused by rainwater infiltration and the cracking of the rock and soil mass inside the slope caused by ground motion load. In the actual project, attention should be paid to the daily monitoring and protection of the slope. The results can provide some references for the daily disaster prevention and control of similar highway high slope projects.

**Key words:** highway high slope; earthquake; rainfall; stability; numerical simulation; instability mechanism

地震和降雨是自然界中常见的两种灾害,其对边坡稳定性的影响极大,是导致边坡失稳和滑坡等地质灾害的主要自然因素<sup>[1-2]</sup>。通过研究降雨和地震对边坡稳定性的影响,可以更好地了解边坡失稳的潜在风险和触发机制,进而开发出更有效的防灾减灾措施,减少人员伤亡和财产损失<sup>[3-4]</sup>。

近年来,针对边坡稳定性的问题,不少学者通过数值模拟、现场监测、试验法等<sup>[5-6]</sup>开展了一系列的研究,如:陈飞等<sup>[7]</sup>利用有限元法对某水库边坡的动力稳定性进行了分析,结果表明边坡变形破坏模式主要表现为弯曲-拉裂-蠕滑-拉裂过程,边坡在“暴雨+地震”工况下处于欠

收稿日期:2024-04-24

作者简介:韩昭玉(1968—),男,高级工程师,从事水文地质与工程地质方面的研究。

稳定状态; 米荟锦等<sup>[8]</sup>采用有限元软件 MIDAS/GTS 对某桥台边坡在自然、暴雨和地震 3 种工况下的稳定性进行了计算, 结果表明在暴雨和地震工况下, 采用预应力锚杆支护体系进行支护后安全系数大于 1.3, 且滑移面贯通趋势得到控制; 何梓雷等<sup>[9]</sup>综合土体应力-应变特性、渗流场特性、地震动应力分布及边坡变形特性对降雨后地震下边坡的变形演化机制进行探讨, 结果表明边坡坡顶与坡脚饱和度显著升高区强度劣化显著, 但整体无明显变形, 在地震阶段, 坡顶首先滑塌失稳, 进一步演化为多级滑塌的整体失稳; 徐佳伟等<sup>[10]</sup>针对地震后降雨下边坡的渗流、变形及失稳破坏过程进行了研究, 发现地震导致路堤边坡土体不连续变形以及表面张拉裂缝产生, 滑移面上土体变形在下部最为明显和集中, 且随着土体高度的增大而逐渐减小; 叶志程等<sup>[11]</sup>对地震和降雨耦合条件下的边坡稳定性进行分析, 发现总降雨量相同时, 短历时强降雨边坡初始安全系数最小, 地震作用后最小平均安全系数也最小, 相对下降幅度却最低, 长历时弱降雨的安全系数下降幅度更大。综上所述, 目前关于地震及降雨作用下边坡稳定性的研究较多, 受限于工程场地的差异性, 不同工程、不同场地条件的边坡在降雨和地震作用下的失稳机理也不同。

本文以某高边坡为工程背景, 采用岩土模拟软件 GeoStudio 研究在降雨及地震影响下的边坡稳定性, 并在此基础上进一步探究两者耦合作用下边坡的失稳机理, 以期为类似公路高边坡工程的日常灾害防治提供依据。

## 1 工程背景

川南地带某高边坡, 其 DK 199 + 511.55 ~ DK 199 + 880.00 段为深路堑铁路段。边坡经削坡处理后, 形成四级边坡。坡脚第一级边坡呈 90°临空状, 标高为 1 180.3 m, 平台宽度为 10 m, 第二级~第四级边坡坡度为 45°, 平台宽度为 2 m。整体坡高约为 34.6 m, 倾向为 220°, 倾角为 2°。自上而下共分为两种岩层, 上层为强风化砂岩, 平均层厚约为 18 m, 下层为强风化泥岩, 平均层厚约为 24 m。削坡后的高边坡如图 1 所示。

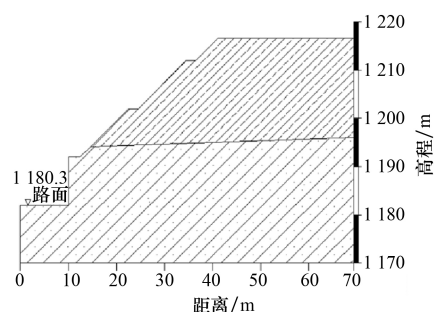


图 1 边坡剖面示意

## 2 稳定性分析方法、模型和参数

### 2.1 分析方法及模型

采用岩土模拟软件 GeoStudio, 建立降雨耦合地震作用下的边坡稳定性计算模型。首先在 seep 中建模分析, 得到降雨作用下的孔隙水压力分布状态; 然后建立初始静态下的 quake 分析模型, 以该项作为父项, 建立等效应力状态下的 quake 分析模型, 进行地震响应分析; 最后进行 slope 分析, 得到地震荷载作用下的堆体稳定安全系数。建立的有限元数值模型如图 2 所示, 为分析滑移面处的位移变化趋势, 计算过程中在边坡表面随机标记一处特征点。

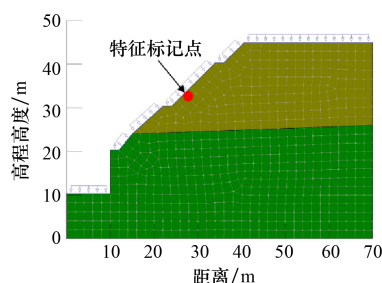


图 2 边坡有限元分析模型

### 2.2 参数取值

通过钻孔取样后在室内试验测试获得各岩土体的基本土力学参数, 如表 1 所示。在降雨过程中, 考虑到表层强风化岩土体的非饱和特性, 根据软件内置样本函数来定义边坡岩土体的土水特征曲线和渗透系数曲线。

### 2.3 数据处理

考虑到最小安全系数出现在某一瞬间, 且由于地震加速度方向的改变, 安全系数随机得到恢复, 刘汉龙等<sup>[9]</sup>提出用最小平均安全系数作为评价指标, 如式(1)所示。

表 1 材料参数

| 材料    | 天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 含水率/% | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 泊松比  | 弹性模量/MPa |
|-------|----------------------------|-------|---------|----------|------|----------|
| 强风化砂岩 | 2.20                       | 19.3  | 35.1    | 29.7     | 0.25 | 75       |
| 强风化泥岩 | 2.56                       | 21.6  | 59.6    | 38.2     | 0.29 | 92       |

$$\overline{F}_{\min} = F_{s0} - 0.65(F_{s0} - F_{\min}) \quad (1)$$

式中： $F_{\min}$ 为最小安全系数； $F_{s0}$ 为初始安全系数； $\overline{F}_{\min}$ 为最小平均安全系数。

依据《建筑抗震设计规范(2016 版)》(GB 50011—2010)，边坡为一级边坡，动力条件下稳定安全系数临界值取 1.15。

2.4 工况设计

基于实际工况(即不考虑地震作用)对数值模型进行验证，降雨强度选取当年监测到的最大雨强 115 mm/d。地震波选用汶川汤峪波，峰值加速度为 0.2g、0.4g，波形如图 3 所示。根据气象学中降雨等级的划分标准<sup>[12]</sup>，同时结合当地实际情况，设置暴雨及大暴雨两种降雨工况，降雨强度分别为 75、150 mm/d。设计计算工况如表 2 所示。

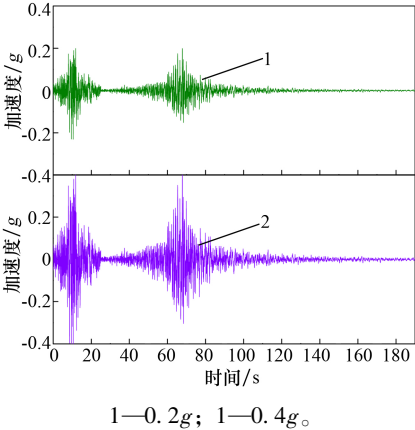
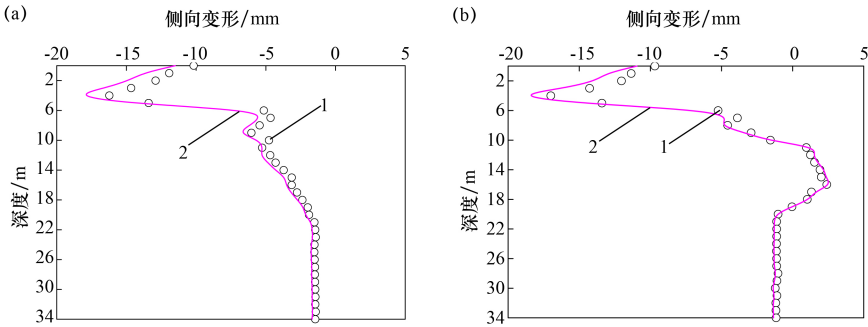


图 3 汶川汤峪波地震加速度曲线



(a) 2023 年 6 月 18 日；(b) 2023 年 6 月 20 日  
1—监测值；2—模拟值。

图 4 测斜值对比

表 2 地震与降雨联合作用工况设计方案 mm/d

| 工况编号 | 地震加速度 | 降雨强度 |
|------|-------|------|
| 0    | —     | 115  |
| 1    | 0.2g  | 150  |
| 2    | 0.4g  | 150  |
| 3    | 0.4g  | 75   |
| 4    | 0.4g  | 150  |

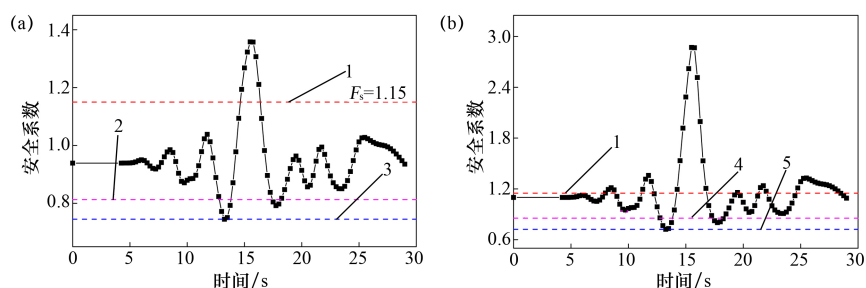
3 结果分析

3.1 模型验证

图 4 为 2023 年 6 月 18 日—2023 年 6 月 20 日，标记点处对应的竖向深度内测斜数据的监测值与模拟值对比结果。由图 4 可知：随着深度的增加，边坡土体的水平变形呈现出先增大后减小的趋势。在 2023 年 6 月 18 日，测斜标记处的最大水平位移监测值为 17.3 mm，模拟值为 17.6 mm；在 2023 年 6 月 20 日，对应的最大水平位移监测值和模拟值分别为 17.5、17.8 mm。综上，实际监测数据与数值模拟结果吻合度较高，表明所建立模型和所选参数取值准确性较高。

3.2 不同降雨强度

当地震加速度不变(0.4g)，不同降雨强度下坡体安全系数变化趋势及渗流稳定云图如图 5 所示。由图 5 可知：当降雨强度为 75、150 mm/d 时，整个地震过程中坡体的安全系数最小值分别

降雨强度/( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ): (a) 75; (b) 150

1— $F_s = 1.15$ ; 2—最小平均安全数 0.813; 3—有限元法最小值 0.745;  
4—最小平均安全数 0.854; 5—有限元法最小值 0.723。

图 5 边坡安全系数变化趋势及渗流稳定云图

为 0.745、0.723, 最小平均安全系数分别为 0.813、0.854。依据 GB 50011—2010 规定, 此时边坡处于不稳定状态, 存在失稳风险, 且根据潜在滑移面云图, 失稳破坏将发生在坡表第二级 ~ 第三级平台之间。此外, 强降雨带来的雨水入渗在边坡表层强风化土体中形成暂态饱和区, 导致边坡土体快速渗透和接近饱和, 特别是在低渗透性土层中, 水分难以迅速排出, 造成边坡饱和, 从而降低边坡的稳定性。同时, 强降雨对边坡表面和土体结构产生侵蚀作用, 尤其是在地震造成的振动作用下, 边坡的土体更容易被水流带走, 导致边坡结构受损, 稳定性下降。此外, 边坡内部在动力荷载作用下会形成大量裂隙, 这些裂隙将成为雨水的优势通道, 使雨水边坡内部形成径流。因此, 通过降低这些部位的抗剪强度, 以进一步降低边坡的稳定性。

图 6 为不同降雨强度下滑移面上特征点的位移变化曲线。由图 6 可知: 地震及降雨刚开始时, 潜在滑移面处的位移呈现出先缓后快的趋势。这主要是因为地震刚开始时, 边坡主要经历弹性变形, 在这个阶段, 边坡的变形和位移相对较小, 且与地震波的作用力成正比。190 s 地震结束后, 降雨强度为 75、150  $\text{mm}/\text{d}$  工况下的最终位移分别为 2.71、11.23 m, 且大暴雨工况下的位移增长趋势并未减缓; 而暴雨工况下的潜在滑移面在地震发生 138 s 后位移开始趋于平缓。这可能是因为在地震后期, 随着动荷载的作用, 裂缝的形成与填充持续进行, 在降雨强度较小时, 特征点处雨水入渗的速度低于裂缝被土颗粒填充的速度, 因此位移呈现出减缓的趋势。

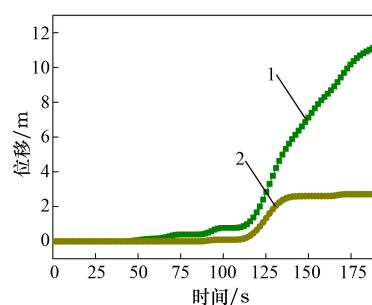
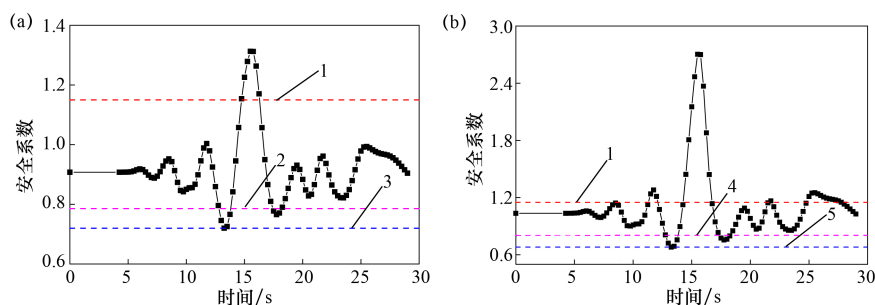
降雨强度/( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ): 1—150; 2—75。

图 6 不同降雨强度下滑移面特征点位移曲线

### 3.3 不同地震加速度

当降雨强度不变(150  $\text{mm}/\text{d}$ ), 不同地震加速度下坡体安全系数变化趋势及渗流稳定云图如图 7 所示。由图 7 可知: 当地震加速度分别为 0.2g、0.4g 时, 整个地震过程中坡体的安全系数最小值分别为 0.720、0.680, 最小平均安全系数分别为 0.786、0.804。依据 GB 50011—2010 规定, 此时边坡处于不稳定状态, 失稳风险较大。根据潜在滑移面云图, 失稳破坏处将发生在坡表第三级 ~ 第四级平台之间, 与不同降雨强度工况相比有所上移。地震加速度的增加使边坡承受更大的动态应力, 甚至超过土体的弹性极限, 导致土体结构破坏, 如裂缝的产生和扩展。这些结构性破坏降低了边坡的整体稳定性。此外, 强降雨会导致边坡内部的孔隙水压力增加, 同时会在边坡表层强风化土体中形成暂态饱和区, 进一步减少土壤颗粒之间的有效应力, 从而降低土体的抗剪强度。当地震发生时, 地震波的传播会加速孔隙水压力的变化, 特别是在饱和或半饱和的边坡中, 这种效应更为显著, 边坡的稳定性逐渐降低。此外, 地震产生的动态载荷会导致边坡材料的应力状态



地震加速度: (a) 0.2g; (b) 0.4g

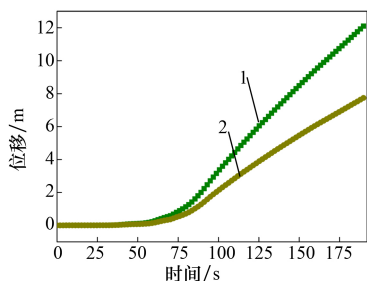
1— $F_s = 1.15$ ; 2—最小平均安全数 0.786; 3—有限元法最小值 0.720;

4—最小平均安全数 0.804; 5—有限元法最小值 0.680。

图7 边坡安全系数变化趋势及渗流稳定云图

迅速改变,特别是当地震加速度较大时,边坡可能会经历较大的剪切变形,从而降低其稳定性,动态载荷还可能引起边坡内部的裂缝发展和滑动面的形成,进一步削弱边坡的整体稳定性。

图8为不同地震峰值加速度下滑移面上特征点的位移变化曲线。由图8可知:不同峰值加速度下,特征点处的位移变化均呈现先慢后快的趋势。主要原因为边坡的响应在地震作用下往往是非线性的,尤其当地震强度较高时,在地震初期,位移的增长可能主要为线性或弹性响应,但随着应力的累积和土体结构的破坏,边坡的变形将进入非线性阶段,位移增长速率显著加快。地震结束后,峰值加速度分别为0.2g、0.4g工况下的最终位移分别为7.74、12.10 m,且两种工况下的位移曲线增长趋势均未减缓。对于非饱和土体,地震震动会导致孔隙水压力的迅速增加,甚至可能发生土体液化,孔隙水压力的增加和土体液化现象会在地震过程中进一步降低土体的有效应力和抗剪强度,从而使得位移增长速率在地震中后期大幅增加;同时,随着地震持续,边坡内部的应力逐渐集中,导致裂缝开始扩展并形成潜在的滑



1—峰值加速度 0.4g; 2—峰值加速度 0.2g。

图8 不同峰值加速度下滑移面特征点位移曲线

动面,裂缝的发展和滑动面的形成降低了边坡的整体抗剪强度,使得位移增长速率开始加快,而地震的结束并非是渐进的,因此最终位移曲线呈现出持续上升趋势。

## 4 结 论

(1) 地震产生的动荷载使得浅层强风化岩土体中形成了雨水径流的优势通道,加速了表层土体的饱和,削弱了土体抗剪强度,导致边坡稳定性降低。当降雨强度为75、150 mm/d时,边坡最小平均安全系数分别为0.813、0.854,存在失稳风险。

(2) 地震波的峰值加速度越大,边坡需要承受的动态荷载越大,当达到土体弹性极限时,土体结构将被破坏,产生大量裂缝。而大量裂缝的产生将导致坡表径流的雨水完全下渗至坡体内部,暂态饱和区形成更快且范围更广,边坡进入不稳定状态的时间越短。当地震加速度为0.2g、0.4g时,边坡最小平均安全系数分别为0.786、0.804,失稳风险较大。

(3) 地震作用下的边坡会从弹性变形阶段逐渐过渡到裂缝发展和滑动面形成阶段,以及后期的加速变形阶段,导致位移增长呈现先慢后快的趋势。滑移面在降雨强度为75、150 mm/d时的最终位移为2.71、11.23 m,在峰值加速度为0.2g、0.4g时为7.74、12.10 m。

## 参考文献:

- [1] 张忠传,何宇翔,杨溢,等. 降雨入渗及地震作用下边坡稳定性研究[J]. 有色金属工程,2020,10(12):122-127.
- [2] 栾树洋,王建祥. 地震和降雨对乌鲁木齐大学路泥岩

- 边坡影响[J]. 内陆地震, 2018, 32(2): 134 – 140.
- [3] 梅涛, 肖盛燮. 降雨 – 地震耦合作用下边坡的稳定性分析[J]. 交通科技与经济, 2012, 14(4): 1 – 3.
- [4] 朱和玲, 张新光. 基于降雨 – 地震耦合作用土质边坡稳定性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(3): 25 – 28; 69.
- [5] 耿天军. 降雨及地震对高填方边坡稳定性影响[J]. 工程建设标准化, 2014(9): 230 – 230.
- [6] 刘汉龙, 费康, 高玉峰. 边坡地震稳定性时程分析法[J]. 岩土力学, 2003(4): 553 – 556; 560.
- [7] 王小龙. 多级路堑边坡地震稳定性可靠度分析[J]. 甘肃科技, 2022, 38(19): 9 – 13; 17.
- [8] 陈飞, 洪伟, 唐军. 汉源县瀑布沟水库某场地边坡稳定性评价[J]. 甘肃水利水电技术, 2023, 59(1): 50 – 53.
- [9] 米荟锦, 黎应书, 王忠. 云南省石屏县新发寨边坡稳定性分析[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(5): 60 – 62.
- [10] 徐佳伟, 蒋玮. 地震及降雨作用下路堤边坡变形破坏特性研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(6): 76 – 86.
- [11] 叶志程, 杨溢. 地震及地震降雨耦合作用下边坡的稳定性分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(2): 142 – 151.
- [12] 降水量等级: GB/T 28592—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

### 本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵, 不再另行支付), 对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明, 如有异议请来稿说明, 本刊将作适当处理。