

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0709

边坡降雨和动荷载耦合作用下模型试验研究

魏艳红¹, 苏销洪², 张 建², 陈 忠^{2*}

(1. 宁波经济技术开发区大港开发有限公司, 浙江 宁波 315800; 2. 宁波宁大地基处理技术有限公司, 浙江 宁波 315211)

摘要: 在降雨和交通荷载等作用下, 边坡经常发生滑坡、崩塌、湿陷等灾害, 为此本文通过设计边坡模型试验系统, 开展降雨和动荷载两个诱因作用下的模型试验, 研究坡内含水率、孔隙水压力和应力的变化规律及动荷载作用下边坡的动力响应, 探讨降雨和动荷载对边坡的影响。结果表明: 雨水入渗后, 较浅土体最快达到饱和, 孔隙水压力最先产生响应, 应力呈上升趋势, 经一段时间降雨后会形成 0~50 cm 的稳态饱和区范围, 最大含水率约 40.8%; 动荷载强度越大, 测点距动荷载越近, 边坡对动荷载的动力响应越强烈, 且动荷载震动频率在 50 Hz 时接近边坡共振频率, 使边坡易引发共振现象; 降雨与动荷载共同作用下, 饱和区会发生下移, 且产生超静孔隙水压力, 导致抗剪强度进一步降低, 对边坡稳定性造成不利影响, 导致边坡从坡顶开始滑塌。

关键词: 降雨条件; 动荷载; 边坡; 模型试验; 有限元模拟

中图分类号: U213.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 03-0096-08

随着我国社会的发展, 越来越多地区已建成高速公路、高铁等基础工程设施, 随之也出现了许多公路边坡问题。降雨和地震是全世界公认引起自然边坡以及人工构筑物变形和失稳的两大主要因素, 每年由此引发的各种灾害会造成高达数十亿美元的财产损失和大量人员伤亡。

众多学者在研究降雨和地震对边坡稳定性的影响时往往会分开考虑, 因为两者在成因机制和作用形式上完全不同。Neuman^[1]通过综合考虑边坡岩土体饱和与非饱和状态后, 建立了相应的渗流计算方程, 为以后统一计算边坡岩土体饱和-非饱和状态提供了理论依据。钱纪芸等^[2]设计了降雨条件下的离心模型试验, 结果表明边坡位移随降雨量的增大而逐渐发展, 并主要集中在边坡表面。覃小华等^[3]在 Green-Ampt 模型基础上, 考虑降雨引起的渗流作用和边坡自身的几何性质, 研究得到基岩层状边坡的安全系数及其表达式与降雨持续时间成正比关系。潘俊义等^[4]通过开展野外人工模拟降雨试验, 测试了不同雨强条件下坡内入渗

规律和应力变化。刘旻等^[5]通过监测坡内含水率、位移、孔隙水压力规律, 研究了干湿循环下红黏土边坡的破坏过程。孙萍等^[6]设计了 3 组现场边坡降雨试验, 研究不同雨强条件下天然黄土边坡的入渗规律及变形破坏模式。赵宏昱等^[7]利用自制模型箱对基覆型边坡开展振动台模型试验, 通过模拟降雨和地震荷载, 并基于相似分析研究了不同降雨停止时长对边坡稳定性的影响, 以及边坡降雨后静止不同时长在地震作用下的失稳特征和破坏模式。简文彬等^[8]以某路堑边坡为对象, 研究了在不同动力输入条件下边坡岩土响应规律。言志信等^[9]分析了岩土体边坡在自重工况、横向地震荷载及纵向竖向耦合地震荷载工况下的破坏过程。此外, 许多国内外学者^[10-13]也对边坡在动荷载影响下的稳定性进行了研究。林宇晨^[14]利用 ABAQUS 软件建立三维模型, 探索边坡在不同降雨类型和地震条件下的稳定性以及变形规律。邹秋元^[15]利用 Midas-GTS 建立计算模型, 采用有重复试验的双因素析因试验, 对滑坡稳定性的进行分析, 其结果

收稿日期: 2023-07-18.

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

基金项目: 国家自然科学基金(42107152).

第一作者: 魏艳红, 硕士/高级工程师, 主要研究方向: 建筑工程. E-mail: 82720994@qq.com

*通信作者: 陈忠, 高级工程师, 主要研究方向: 岩土及地下工程. E-mail: 791695763@qq.com

直观表明: 降雨条件不变时, 施加坡顶荷载, 其安全性系数降低 16%~21%; 坡顶荷载不变时, 施加强降雨, 其安全性系数下降 10%~19%。

当雨水大量渗入边坡时, 不仅会造成土体容重增加, 使下滑力变大, 而且会使土体内孔隙水压力增大, 抗剪强度减小, 在动荷载作用下更容易发生失稳。鉴于当前对研究动力荷载和降雨因素共同作用对边坡稳定性方面的工作较少, 由此加强此方面研究具有十分重要的实际意义。本文通过设计边坡模型试验系统, 研究降雨和动荷载影响下坡内孔隙水压力、应力和渗流场的变化规律及动荷载对边坡的动力响应特性。

1 模型试验设计

1.1 试验装置

模型试验系统由模型箱、降雨系统、监测系统和动荷载系统组成。模型箱尺寸(长×宽×高)为 3 m×1 m×1 m, 边坡坡度为 45°, 如图 1 所示。主体框架由 4 块 5 mm 厚的钢板组成, 每块钢板由角钢焊接加固, 2 个侧面都焊接 2 根 3 cm×4 cm 方钢进行加固, 以限制土压力引起的钢板变形, 使模型箱有足够的稳定性和刚度。

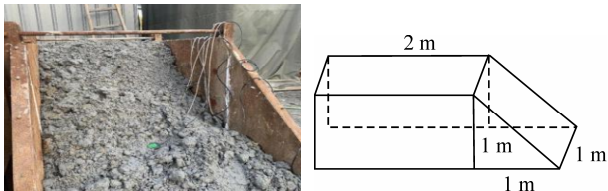


图 1 模型箱示意图

降雨系统包括供水管线、供水加压装置及降雨喷头。供水管线由外径 20 mm 的 PVC 硬管组成, 管线用铁丝绑扎在 1 m 高的支架上; 加压装置选用自吸增压泵, 功率 750 W, 扬程 40 m; 降雨喷头选用 4 个高压雾化喷头, 雾化效果好, 水滴喷洒均匀, 影响范围大约 1 m², 喷头流量为 40~80 L·h⁻¹。

监测系统包括传感器和数据采集仪。传感器选用 RS485 水分传感器、DMKY 孔隙水压力计、DMTY 土压力盒及压电式震动加速度传感器; 数据采集仪选用 DM-YB1840 动静态电阻应变采集仪, 可接各种应变式传感器, 加速度传感器信号则是由 JM5937 动态信号采集器采集。

动荷载系统由激振器(TJZ-20 激振器)、功率放

大器、函数信号发生器组成。大致使用步骤如下: 在函数信号发生器内输入一个交变电流信号, 通过功率放大器将小功率信号放大输出给激振器, 缓慢调节功率放大器的增益旋钮, 直至满足激振器的输出功率要求为止。

1.2 模型填土

试验采用分层压实人工填土(黏土和 325#水泥配置, 水泥掺量 5%), 每层 25 cm 厚, 共分 4 层, 每填好一层土后, 均需用 10 kg 铁块均匀击实。填土的相关物理指标见表 1。

表 1 填土的物理指标

物理指标	数值
天然含水率/%	15
泊松比	0.32
黏聚力/kPa	20
内摩擦角/(°)	22
密度/(kN·m ⁻³)	18.25
孔隙比	0.42

1.3 传感器埋设

在模型填筑时, 如图 2 所示在坡体内布设测点, 每个监测点的垂直和水平间距均为 25 cm, 共埋设 6 个水分传感器和孔隙水压力传感器以及 4 个土压力盒。激振器布置在坡顶 A 点或 B 点, 坡肩、坡中、坡脚的 a、b、c 点布置震动加速度传感器。

□ 孔隙水压力计+水分传感器
△ 土压力盒

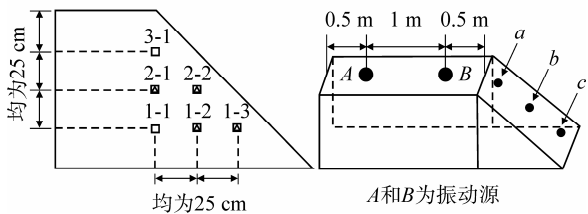


图 2 仪器和传感器布置示意图

1.4 试验方案

在 2 个模型箱填筑、测点布设完成后, 静置 1 周, 对 2 个模型分别考虑降雨以及降雨和动荷载共同作用对边坡的影响。

试验方案①: 对第 1 个边坡模型开展降雨试验, 研究降雨入渗作用。试验时, 安装降雨装置, 打开增压泵, 降雨喷头旋至最大流量并始终不变, 预计雨强 50~70 mm·h⁻¹, 降雨时长 1.5 h。试验过程中打开采集仪自动记录孔隙水压力和土压力数据, 采集

间隔设置为 1 min; 土壤水分传感器则通过笔记本电脑的采集软件读取, 读取间隔为 3 min.

试验方案②: 对第 2 个边坡模型开展动荷载试验, 研究其动力响应规律. 将激振器放在 *B* 点位置, 打开函数信号发生器, 函数信号类型选择正弦波, 将车辆荷载视作随时间作周期性变化的简谐振动, 力的大小和方向由交变电流控制, 并通过坡面放置的加速度传感器测定加速度.

试验方案③: 对第 2 个边坡模型进行降雨及动荷载试验, 降雨装置安装完毕后打开增压泵, 增压泵压强同试验①一致, 降雨喷头旋至最大流量始终不变. 将激振器放在 *B* 点位置, 设置好信号源频率和幅度. 测定孔隙水压力、土压力以及加速度.

2 试验结果及分析

2.1 降雨作用

2.1.1 含水率

图 3 为降雨 1.5 h 过程, 不同深度测点含水率时程曲线. 由图可见, 在降雨初期 10 min 内, 各测点的体积含水率无明显变化, 随着雨水渗入坡内, 历时 10 min 后, 测点 3-1 最先产生反应, 体积含水率快速上升, 到 15 min 时, 测点 2-2 及 1-3 的含水率紧接着也快速上升, 3 个测点的含水率上升趋势基本一致, 并在 30 min 后稳定在 40.8%. 分析认为这是由于测点 3-1、2-2、1-3 的深度最浅, 雨水入渗后快速到达, 因此比其他测点先响应, 而测点 3-1 的含水率上升速度比其余 2 个测点快, 是因为测点 2-2、1-3 在坡面下方, 雨水部分沿着斜坡流下, 导致入渗速度较测点 3-1 稍慢. 降雨历时 25 min 后, 上部土体的孔隙水稳定渗流到达土层下方 50 cm 处, 测点 1-2、2-1 的含水率明显上升, 并在 40 min 后稳定在 38.2%~38.6%, 而测点 1-1 的含水率在降雨 40 min 后才开始有小幅提高, 此时该点尚未形成稳定渗流场, 直至试验结束后, 含水率才上升至 24%. 其原因是雨水受到自重和土体的基质吸力作用, 通过边坡表面快速入渗, 然后逐渐往坡内延拓, 形成局部的稳定渗流, 经历一定时间后, 当雨水到达各深度的测点后, 含水率才快速增长, 使基质吸力逐渐减小, 饱和度慢慢达到稳定; 雨水入渗后表面的土体最快饱和, 随着降雨时长增加, 向下形成渗流场, 饱和区面积进一步增加, 最后形成

稳态饱和区.

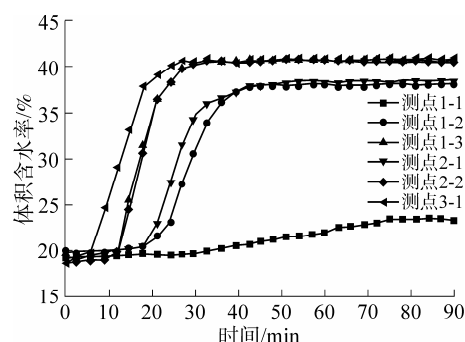


图 3 不同深度各测点含水率—时间曲线

由图 3 还可以看出, 测点 3-1 和 2-2 稳定时含水率为 40.8%, 为饱和状态; 测点 2-1 和 1-2 稳定时的含水率约为 38.4%, 趋于饱和. 由此确定稳态饱和区大概在 0~50 cm 深度, 在此区域中土体容重增加, 抗剪强度降低, 下滑力增大, 容易发生失稳.

2.1.2 孔隙水压力

图 4 为试验过程中不同深度各测点孔隙水压力—时程曲线. 由图可见, 由于土体为非饱和状态, 孔隙中存在基质吸力, 各测点初始孔隙水压力为负. 降雨初期, 各测点孔隙水压力均无明显变化, 历时 15 min 后, 测点 3-1、2-2、1-3 最先对雨水入渗产生响应, 孔隙水压力逐步增加, 并在 40~45 min 达到稳定. 历时 30 min 后, 测点 1-2、2-1 处的孔隙水压力开始增加, 在 50~60 min 达到稳定, 最大约 5 kPa. 由于土体还未完全饱和, 孔隙中还存在少量空气, 因此孔隙水压力有轻微波动. 在整个降雨过程中, 测点 1-1 的孔隙水压力始终为负, 且有波动, 这是因为该点含水率上升不明显, 孔隙中还存在大量空气. 原因是在降雨初期, 土内基质吸力较大, 雨水进入土体的渗流速率较大, 到达测点后孔隙水压力快速增加, 较浅测点先达到稳定状态, 相

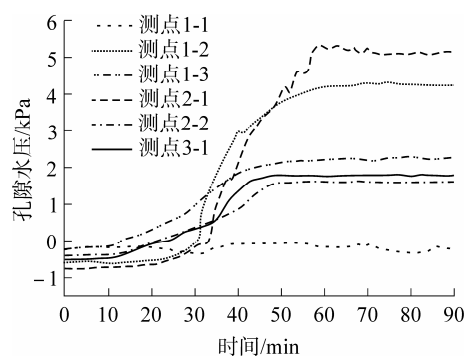


图 4 不同深度各测点孔隙水压力—时间曲线

较于土体达到饱和的时间, 孔隙水压力达到稳定的时间有一定滞后性. 而测点 1-1 的孔隙水压力变化不明显, 说明雨水渗流主要是沿着坡面方向, 上部渗流水不继续往下移动.

2.1.3 土压力

图 5 为同一深度测点的土压力—时程曲线. 由图 5(a)可以看出, 测点 2-1 和 2-2 的土压力先增加后达到稳定, 这是由于前期雨水入渗, 上部土体快速达到饱和状态, 土体容重增加导致土压力上升, 随后处于一段时间的稳定状态. 在 50~60 min 后, 测点 2-1 先小幅度上升后呈下降趋势, 分析认为此时降雨已经较长时间, 坡顶慢慢产生了积水, 土压力随之增加, 最大值约 5.5 kPa. 随着降雨的持续, 边坡出现裂缝, 径流进入裂缝冲刷走部分土体, 应力得到释放, 导致测点 2-1 土压力下降, 等应力重新分布后则再次稳定. 而测点 2-2 受影响相对较小, 只产生了小幅度波动, 总体处于相对稳定.

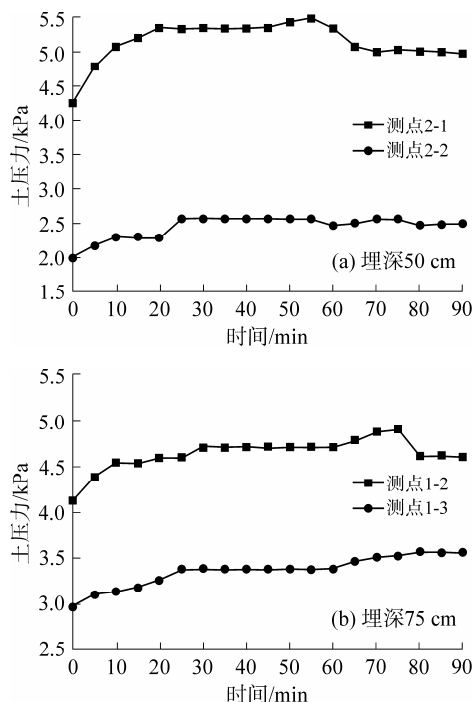


图 5 相同深度测点的土压力—时间曲线

由图 5(b)可以看出, 测点 1-2 和 1-3 的土压力也是先增加再相对稳定, 60 min 后, 2 个测点的土压力均小幅度上升. 分析认为 2 个测点分布在坡脚范围, 随着降雨时长的增加, 雨水汇聚在坡脚, 容重增加, 导致土压力上升. 当降雨持续, 测点 1-2 随着土体沉降发生相对位移, 应力得到释放, 导致土压

力下降, 等应力重新分布后再次稳定.

2.2 动荷载作用

将车辆荷载视作随时间作周期性变化的简谐振动^[15], 将激振器放在指定位置, 信号发生器输出波形选择正弦波, 测定边坡的加速度.

2.2.1 激振力影响

将激振器放置在 *B* 点位置, 频率固定为 30 Hz 不变, 缓慢匀速旋转功率放大器的增益按钮, 从而使激振力线性增加, *a*、*b*、*c* 点的加速度—动荷载强度曲线如图 6 所示.

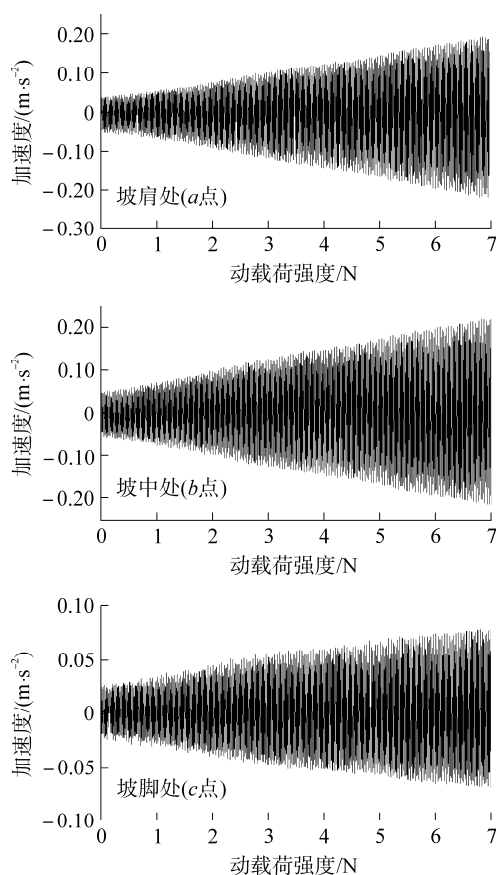


图 6 不同测点的加速度—动荷载强度关系曲线

由图 6 可以看出: 坡面各监测点的加速度随激振力的增大而增大, 加速度增幅呈现明显的线性增加. 对比 *a*、*b*、*c* 点加速度曲线, 可发现坡肩(*a* 点)和坡中(*b* 点)的最大加速度分别为 $0.19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 、 $0.20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 两者相差较小, 说明坡肩到坡中的载荷波折减不明显, 而坡脚(*c* 点)的最大加速度为 $0.075 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 原因是荷载波传递到坡脚折减较大, 造成坡脚对动荷载的动力响应有明显的衰减.

对加速度曲线进行处理, 得到位移—动荷载

强度关系曲线如图 7 所示. 可以看出, 坡面上各点的最大位移同样随着激振力的增加而增加, 坡肩最大, 坡中次之, 坡脚最小; 位移随高度降低而减小, 高度降低得越多, 位移减小的幅度越大, 动荷载的影响衰减得越多.

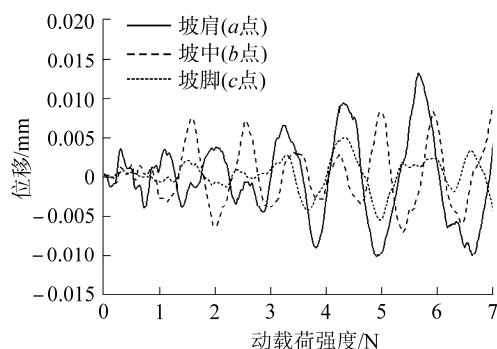


图 7 各测点位移—动荷载强度关系曲线

2.2.2 动荷载频率影响

将激振器功率调到最大, 信号源频率从 30 Hz 增大到 100 Hz, 各测点最大加速度差和最大位移差的变化规律如图 8 所示. 由图可见, 随着震动频率的增加, 各监测点最大加速度差和最大位移差均呈现先增大再减小的规律, 最大加速度差出现在频率 50 Hz 时, 最大位移差出现在 60~70 Hz 范围, 频率在 90 Hz 以上时则很小. 以上结果表明: 边坡

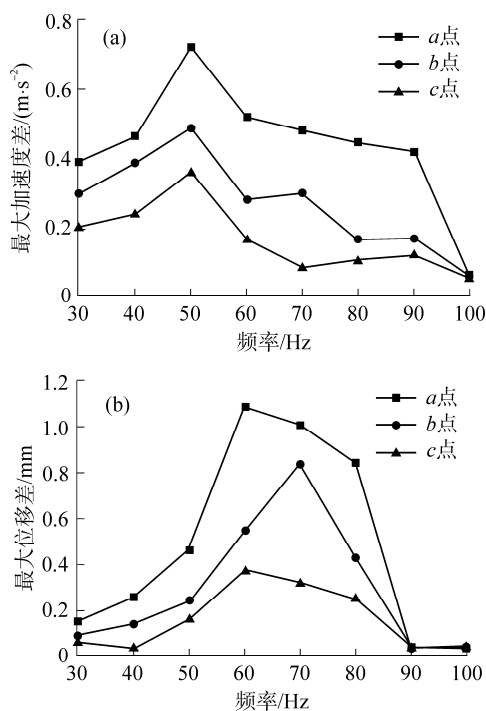


图 8 频率对最大加速度差(a)和位移差(b)的影响

对动荷载反应最强烈的频段为中频(50~70 Hz), 高频段影响(100 Hz 以上)则较小, 而高频主要对震源的影响较大. 原因认为本试验边坡的共振频率在中频范围, 动荷载震动频率越接近边坡共振频率时, 则越容易引发共振现象, 对边坡稳定性的影响也就越大. 而对于不同岩土构造的边坡, 其实际共振频率也不同, 对动荷载的响应也不相同.

2.2.3 震源位置影响

保持激振器最大功率不变, 分别在 A、B 点激振, 得到不同震源位置的最大加速度差与频率关系曲线(图 9). 可以看出, A 点激振与 B 点激振的规律基本一致, 随着频率的增加, 最大加速度差均呈现先增大再减小的规律, 边坡对中频段的动荷载响应最激烈. 对比不同震动位置的 2 条曲线可知, 相同频率条件下, 动荷载 B 引起的最大加速度差基

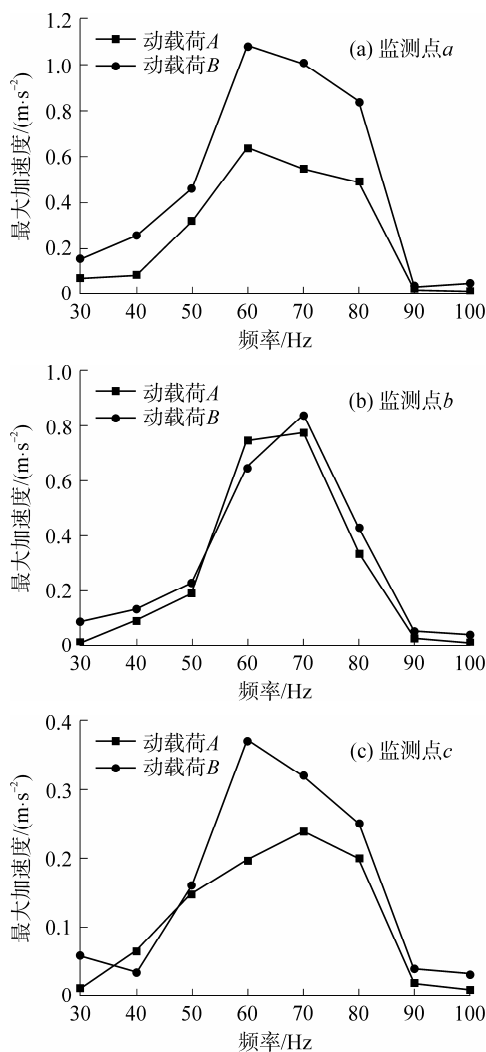


图 9 震源位置对各测点最大加速度差的影响

本比动荷载 A 大,再次说明动荷载离得越近,边坡的动力响应越强烈,随着动荷载距离的变远,对边坡的影响逐渐减弱。

2.3 降雨及动荷载

降雨系统安装与试验方案①一致,并将激振器放在 B 点,功率调到最大,频率 50 Hz,通过采集仪记录传感器数据。

2.3.1 含水率

图 10 是降雨及动荷载共同作用下各测点含水率—时程曲线。可以看出,在降雨历时 10 min 后,测点 3-1 最先产生反应,含水率快速上升,紧接着测点 2-2 及 1-3 的含水率也快速上升。历时 25 min 后,测点 3-1 和 2-2 达到暂时的稳定状态,此时该处土体饱和,在 40~50 min 时,2 个测点的含水率均出现了下降现象。分析其原因,认为在动荷载的持续作用下,坡体逐渐开裂,边坡发生破坏,测点 3-1 和 2-2 离表面最近,破坏产生的裂缝使该处的水分不断流失,并且坡顶局部滑塌导致传感器部分脱离土体暴露在空气中,导致 2 个测点的含水率下降。而测点 1-3 饱和后,并没有出现含水率下降的趋势,是因为该点处于坡脚范围,动荷载对其影响较小,没有产生大裂缝,并且渗流水汇集在坡脚,始终处于饱和状态。

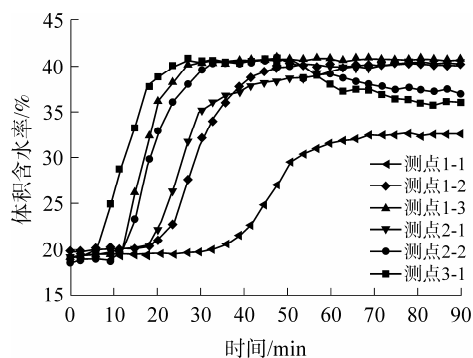


图 10 不同深度各测点体积含水率—时程曲线

对比图 10 和图 3 中的测点 2-1 和 1-2 可以发现,历时 40 min 后,测点处的土体没有达到稳定状态,且含水率还在继续增加,最终直至饱和。造成这种现象的原因是在添加动荷载后,土体出现裂缝,雨水通过这些裂缝流进坡内到达 50 cm 深度,导致测点 2-1 和 1-2 迅速饱和。观察测点 1-1 的含水率规律可以发现,该点在历时 40 min 后,含水率快速上升,说明雨水大量入渗到深度 75 cm,在动荷

载持续作用下改变了坡内的渗流场,造成孔隙水继续往下运动,使得饱和区发生下移。

2.3.2 孔隙水压力

选取测点 3-1、2-2、1-3 来研究,绘制的孔隙水压力—时程曲线如图 11 所示。由图可见,在降雨初期,各测点的孔隙水压力均无明显变化,在 20 min 后,3 个测点的孔隙水压力迅速增加,对比单降雨作用下的孔隙水压力曲线(图 4)可以发现,3 个测点的最大孔隙水压力均比单降雨情况下大,这是由于动荷载作用产生了超静孔隙水压力,此时有效应力进一步减小,土颗粒间摩擦力降低,造成坡体滑移。60 min 后,测点 3-1 和 2-2 处的孔隙水压力急剧减小,分析认为是由于坡体滑移,较浅的 2 个测点处的孔隙水压力计脱离土体,超静孔隙水压力消失。而测点 1-3 在达到最大孔隙水压力后缓慢减小,原因是随着时间的增加,坡脚处土体在排水固结,造成超静孔隙水压力慢慢消散。

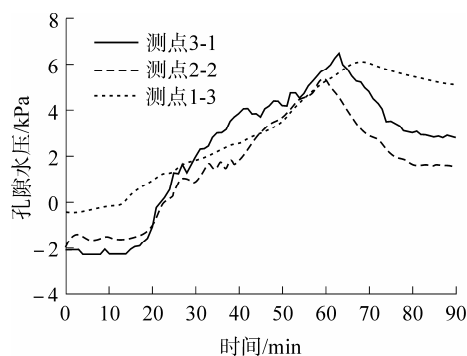


图 11 不同测点的孔隙水压力—时程曲线

2.3.3 土压力

图 12 为同一深度部分测点的土压力—时程曲线。由图 12(a)可见,随着降雨时长的增加,雨水快速入渗,土体容重增加,导致测点 2-1 和 2-2 处的土压力上升。在 50~60 min 后,坡肩受到动荷载的持续作用发生滑塌,土体不断被雨水冲刷流失,土压力急剧减小,应力得到释放,测点 2-1 下降幅度最大,说明此测点上方滑坡最严重。

在图 12(b)中测点 1-2 与图 12(a)中测点 2-1 的土压力变化规律基本一致,前期呈上升趋势,边坡滑塌时急剧减小,但下降幅度比测点 2-1 小。而测点 1-3 在 60 min 后,土压力只出现小幅度下降,原因是由于坡脚处没有发生明显滑移,只是出现了小裂缝,土体没有被雨水大量冲刷流失,因此土压

力减小不明显。

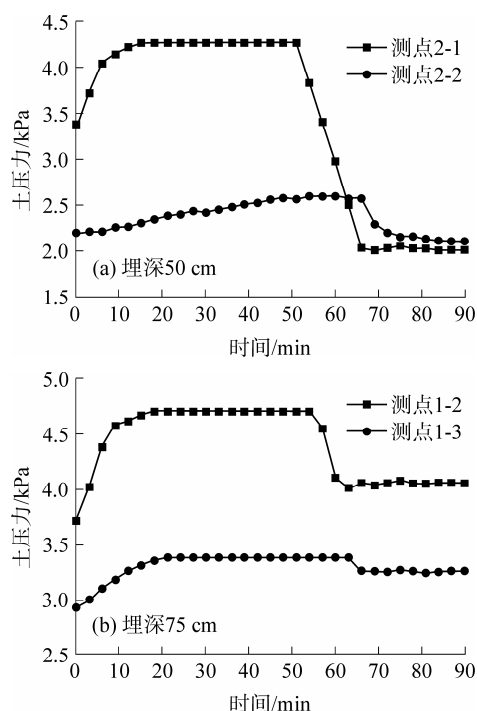


图 12 相同深度部分测点的土压力—时程曲线

2.3.4 滑坡机理

当降雨导致雨水大量入渗时, 坡体含水量快速增加, 土体容重增加, 基质吸力减小; 当土体饱和时, 抗剪强度最小, 有滑坡的趋势。同时, 强降雨会导致坡顶出现裂痕, 当雨水流入后坡一定深度时, 非饱和土会迅速饱和软化; 此外, 雨水大量渗入会使土颗粒间形成水膜, 土颗粒间的胶结作用被削弱, 并且水膜会使土颗粒间的摩擦力减小。在强降雨加上循环动荷载作用下, 坡内产生超静孔隙水压力, 使有效应力减小, 造成抗剪强度进一步减小, 当震动荷载频率接近边坡共振频率时, 边坡动力响应最强烈, 造成土颗粒间发生相对滑动, 使降雨产生的裂缝进一步扩大, 当抗滑力小于下



图 13 降雨和动荷载作用下的边坡滑塌

滑力时, 边坡从坡顶处开始发生破坏失稳(图 13)。

3 结论

通过设计 2 个边坡模型, 模拟降雨和动荷载对边坡稳定性的影响, 研究了含水率、孔隙水压力、土体应力和坡面动力响应规律, 主要结论如下:

(1) 雨水受到自重作用和土体的基质吸力, 通过表面快速入渗, 然后逐渐往坡内延伸, 含水率快速增加, 饱和度慢慢达到稳定状态, 最大含水率约 40.8%; 雨水入渗后, 表面土体最快达到饱和, 并随着降雨时长增加向下形成渗流场, 其饱和区面积进一步增加, 最后形成稳态饱和区范围 0~50 cm, 最大含水率约 40.8%, 在动荷载作用下饱和区会发生下移。

(2) 降雨初期, 坡内孔隙水压力不变且为负值, 土内基质吸力较大, 雨水进入土体后的孔隙水压力呈增加趋势, 距表面土体较浅的测点先达到稳定状态, 最大值约 5 kPa。相较于土体达到饱和的时间, 孔隙水压力达到稳定有一定滞后性。在动荷载作用下会产生超静孔隙水压力, 导致抗剪强度进一步降低, 对边坡稳定性造成不利影响。

(3) 雨水的渗入使坡内测点应力增大, 最大值约 5.5 kPa。随着降雨时长增加出现裂缝, 应力得到释放。在动荷载持续作用下, 坡顶最先滑塌, 下方土体的应力急剧减小, 而坡脚滑移不明显, 故应力降低幅度较小。

(4) 动荷载强度越大, 测点距动荷载越近, 边坡对动荷载的动力响应越强烈; 动荷载震动频率在 50 Hz 时接近边坡的共振频率, 易引发共振现象, 对边坡稳定性的影响也就越大。

(5) 在降雨作用下, 坡顶、坡中和坡脚的位移增大, 大小及增幅均为坡顶最大, 坡中次之, 坡脚最小。在动荷载共同作用下, 坡顶、坡中、坡脚的位移在波动中上升, 其中坡顶震动幅度最大, 坡脚受震动影响很小, 故发生破坏时从坡顶开始滑塌。

参考文献:

- [1] NEUMAN S P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99(12):2233-2250.
- [2] 钱纪芸, 张嘎, 张建民. 降雨条件下土坡变形机制的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2):398-402.

- [3] 覃小华, 刘东升, 宋强辉, 等. 强降雨条件下基岩型层状边坡入渗模型及稳定性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11):3156-3164.
- [4] 潘俊义, 侯大勇, 李荣建, 等. 不同雨强下黄土边坡降雨入渗测试与分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1170-1177.
- [5] 刘旸, 陈开圣, 吕梦飞, 等. 干湿循环下红黏土边坡响应的模型试验[J]. 水利水电技术, 2018, 49(8):193-203.
- [6] 孙萍, 王刚, 李荣建, 等. 降雨条件下黄土边坡现场试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2):466-476.
- [7] 赵宏昱, 杨兵, 王国义, 等. 雨后不同时长基覆型边坡动力失稳破坏研究[J/OL]. 防灾减灾工程学报, 2023, 1-9. DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230301003.
- [8] 简文彬, 胡忠志, 樊秀峰, 等. 边坡对循环荷载的响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12):2562-2567.
- [9] 言志信, 张森, 张学东, 等. 地震边坡失稳机理及稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6):844-850.
- [10] ABDELMAGIED M F. Analysis of slope stability of canals' embankments under traffic load[J]. Advances in Research, 2019, 19(3):1-12.
- [11] CHEN Y L, LIU G Y, LI N, et al. Stability evaluation of slope subjected to seismic effect combined with consequent rainfall[J]. Engineering Geology, 2020, 266: 105461.
- [12] WU T Y, ZHOU C B, JIANG N, et al. Stability analysis for high-steep slope subjected to repeated blasting vibration[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(17):7207-7227.
- [13] SCHMÜDDERICH C, MACHAČEK J, PRADA-SARMIENTO L F, et al. Strain-dependent slope stability for earthquake loading[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 152:105048.
- [14] 林宇晨. 不同降雨和地震条件下边坡的稳定性分析研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [15] 邹秋元. 坡顶荷载和强降雨作用下的滑坡稳定性析因分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(12): 158-160.

Experimental study on slope model considering rainfall and dynamic load effects

WEI Yanhong¹, SU Xiaoqi², ZHANG Jian², CHEN Zhong²

(1.Ningbo Economic and Technical Development Zone Dagang Development Co., Ltd., Ningbo 315800, China;

2.Ningbo Ningda Foundation Treatment Technology Co., Ltd., Ningbo 315211, China)

Abstract: Under the action of rainfall and traffic load, landslides, collapses, collapse and other disasters often occur on the slope. The slope model test system is designed in this paper, and the model tests under the inducement of rainfall and dynamic load are carried out to study the change law of moisture content, pore water pressure and stress in the slope and the dynamic response of the slope under dynamic load. Abaqus finite element method is used to simulate the variation of seepage and saturation in the slope during rainfall. The effects of rainfall and dynamic load on the slope are discussed. The results show that after rainwater infiltration, the shallower soil reaches saturation the fastest, pore water pressure responds first, and stress shows an upward trend. After a period of rainfall, a steady-state saturation zone range of 0–50 cm will be formed, with a maximum moisture content of about 40.8%; The greater the strength of the dynamic load, the closer the measuring point is to the dynamic load, the stronger the dynamic response of the slope to the dynamic load, and the vibration frequency of the dynamic load is close to the slope resonance frequency at 50 Hz, making the slope prone to resonance phenomenon; Under the combined action of rainfall and dynamic loads, the saturated zone will move downwards and generate excessive pore water pressure, resulting in further reduction of shear strength and adverse effects on slope stability, leading to slope collapse from the top of the slope

Key words: rainfall conditions; dynamic load; slope; model testing; finite element simulation

(责任编辑 章践立)