

多技术融合的地震多发区边坡及场地稳定性分析与加固治理研究

于丰泽, 黄方泉, 董云

核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都
Email: daniel_dongyun@163.com

收稿日期: 2021年3月25日; 录用日期: 2021年4月14日; 发布日期: 2021年4月21日

摘要

西南山区多高边坡, 这些高边坡的安全稳定对坡脚工程的正常运行至关重要, 地震多发区工程问题更加复杂, 需要融合多种技术手段加以解决。本文对西南山区某重大工程中出现的工程问题进行了描述, 并就该工程项目采用数值分析、大型振动台模型试验、离心振动台模型试验等方法在边坡及场地稳定性分析与加固治理方案研究方面的运用进行了叙述。融合这些技术很好地解决了该工程场地及边坡工程地质、水文地质和抗震安全方面的关键性技术问题, 充分显示了采用多技术融合方式解决复杂工程科学问题的必要性, 值得借鉴。

关键词

边坡, 稳定性, 加固, 振动台试验, 数值分析

Stability Analysis and Reinforcement of Slope and Site in Earthquake Prone Area Based on Multi Technology Integration

Fengze Yu, Fangquan Huang, Yun Dong

Nuclear Industry Southwest Survey and Design Institute Co., Ltd., Chengdu Sichuan
Email: daniel_dongyun@163.com

Received: Mar. 25th, 2021; accepted: Apr. 14th, 2021; published: Apr. 21st, 2021

Abstract

There are many high slopes in southwest mountainous area. The safety and stability of these high slopes are very essential to the normal operation of slope toe engineering. The engineering problems in earthquake prone areas are more complicated, which need to be solved by a combination of

various technical means. This paper describes the engineering problems that occurred in a major project in southwest mountainous area, and describes the application of numerical analysis, large-scale shaking table model test, centrifugal shaking table model test and other methods using in slope and site stability analysis and reinforcement treatment scheme research. The integration of these technologies well solved the key technical problems of engineering geology, hydrogeology and seismic safety of the engineering site and slope, fully showed the necessity of using multi technology integration method to solve complex engineering scientific problems, which is worthy of reference.

Keywords

Slope, Stability, Reinforcement, Shaking Table Model Test, Numerical Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在我国西南山区，高边坡众多，其安全稳定对坡脚各类工程设施的正常运行至关重要。由于地处龙门山断裂带复杂的地质环境中，加之受“5.12”汶川大地震及余震影响，许多工程项目的地质构造特性、工程地质、水文地质性质已发生很大变化，以至于一些地区出现的山体开裂、岩体松弛、土体滑动、地下水活动性增强等地质灾害现象都与此有关。为了保证已实施工程持续安全稳定运行，需进行安全稳定复核，必要时进行加固整治。目前，采用相对单一技术，针对边坡稳定性分析及加固的相关研究较多。叶海林[1]等采用振动台进行了预应力锚索支护岩质边坡模型试验，研究了锚索在地震作用下的动力响应。朱森俊[2]使用 GEO-SLOPE 和 UDEC 对边坡进行了稳定性分析，得出了最不利组合面和影响边坡稳定性的最主要因子，并优化了加固处理措施。吕群财[3]采用工程地质分析和理论计算相结合的方法对某边坡进行了稳定性分析，并采用 MIDAS 对边坡的加固方案进行了可行性研究。但针对断裂构造、地下水和强地震共同作用产生的复杂工程问题的研究较少。本文利用数值分析、大型振动台模型试验、离心振动台模型试验等多种技术手段对某重大工程进行安全稳定分析，并对加固治理措施进行总结。

2. 工程概况

某高边坡工程位于西南山区，修建初期便有 1#、2#两处滑坡形成，采用截排水及格构锚索等措施对其进行治理，但在经历雨季之后，两处滑坡变形再次加剧。其中 2#滑坡北东侧锚喷破坏，坡面发育大量拉裂缝，中下部形成 1 个体积约 $0.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑塌体，原有支护措施多处失效，同时东侧边坡也存在不同程度变形，整个边坡存在继续变形破坏和整体失稳的高风险，严重威胁坡脚在建工程。为了更好地服务加固整治，本工程进行了必要的工程科研。

3. 边坡及场地稳定性分析

3.1. 场地断层、软弱结构面对场地稳定性的影响研究

本工程场地内断层裂隙众多，地质环境复杂。为了掌握场地断层、软弱结构面工程地质力学特征，并分析研究其对场地稳定性的影响，本工程运用了现代构造地质学和工程地质学的理论，采用了野外和室内构造解析、断层物探、山地工程、断层物质年代学测试、断层物质力学性质测试及构造建模等技术手段。在稳定性影响研究方面，此处涉及五个方面的子研究，具体见图 1。

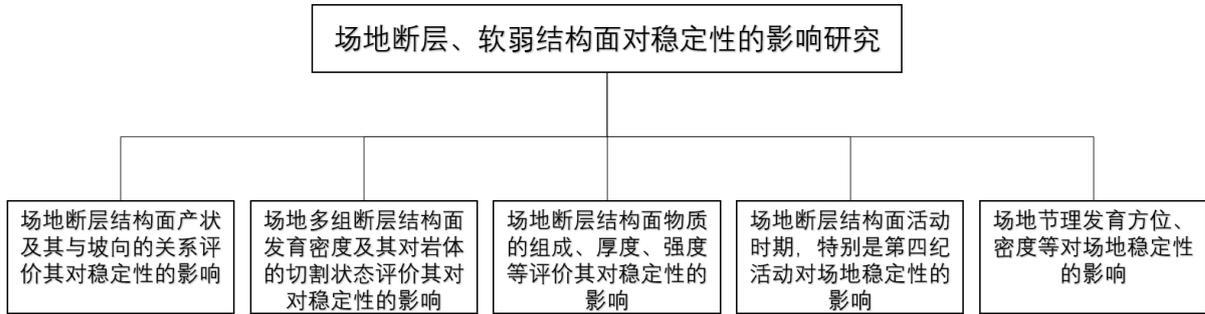


Figure 1. Research on the influence of site faults and weak structures on stability

图 1. 场地断层、软弱结构面对稳定性的影响研究

通过研究发现断裂分布、运动、力学形状以及活动时期等均对场地稳定性存在影响[4], 其中西端发育近 S-N 向节理密集带是重要的节理密集带, 分割了东西两侧不同的坡体结构; 场地内还发育近 E-W 向节理密集带, 分割了南北两侧不同的坡体结构。本工程还综合研究了断层、软弱结构面工程地质力学特征, 提出了应用于工程实践的力学参数。此外还针对开挖、地下水对岩体松弛的影响进行了研究, 得出松弛岩体长期作用下, 对于本工程边坡稳定是不利的。

3.2. 场地水文地质条件对场地稳定性影响研究

本工程边坡和场地地下水活动强烈, 对边坡稳定和场地安全有重大影响。为了分析场地水文地质条件对场地稳定性的影响, 本工程采用了水文地球化学分析、钻探及试验、钻孔声波测井、数值模拟等技术方法。本文仅从地下水渗流数值模拟角度进行叙述。

本研究项目利用地下水三维数值模拟软件对该工程边坡、场地地下水渗流场模拟计算, 主要模拟天然渗流场及其变化特征, 模拟各种地下水排水方案的排水效果, 为排水工程优化提供技术支撑[5]。首先建立模拟区概化模型并进行离散化, 然后确定模拟区边界条件, 并选定模拟区水文地质参数, 之后进行地下水的初始渗流场模拟、场地开挖前后(天然、暴雨情况下)地下水渗流场模拟, 最后进行各种排水方案的排水效果模拟。研究区开挖前暴雨情况下渗流场模拟见图 2, 开挖后暴雨情况下渗流场模拟见图 3, 无排水设施下暴雨后渗流场见图 4, 仰斜排水孔 + 集水井 + 渗沟排水方案暴雨后渗流场见图 5。

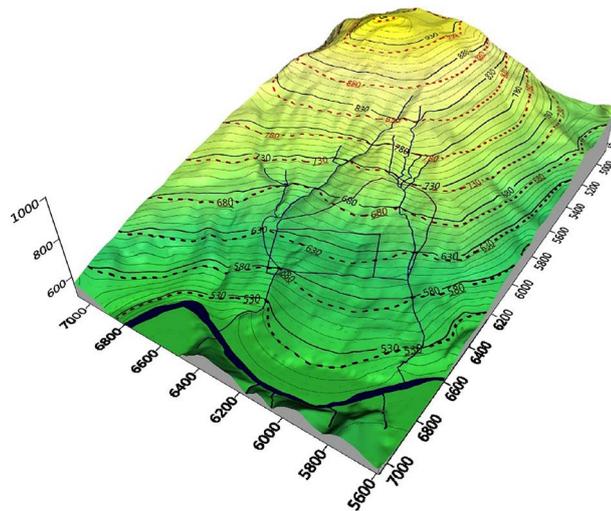


Figure 2. Curve: system result of standard experiment

图 2. 研究区开挖后暴雨情况下渗流场模拟结果

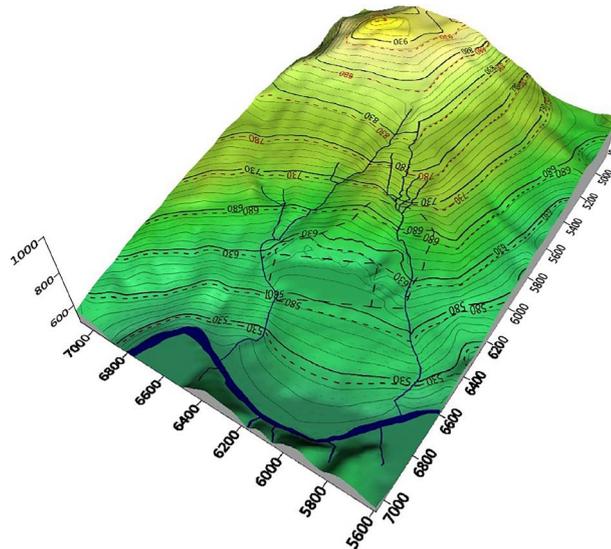


Figure 3. Simulation results of seepage field under heavy rain after excavation in the study area

图 3. 研究区开挖后暴雨情况下渗流场模拟结果

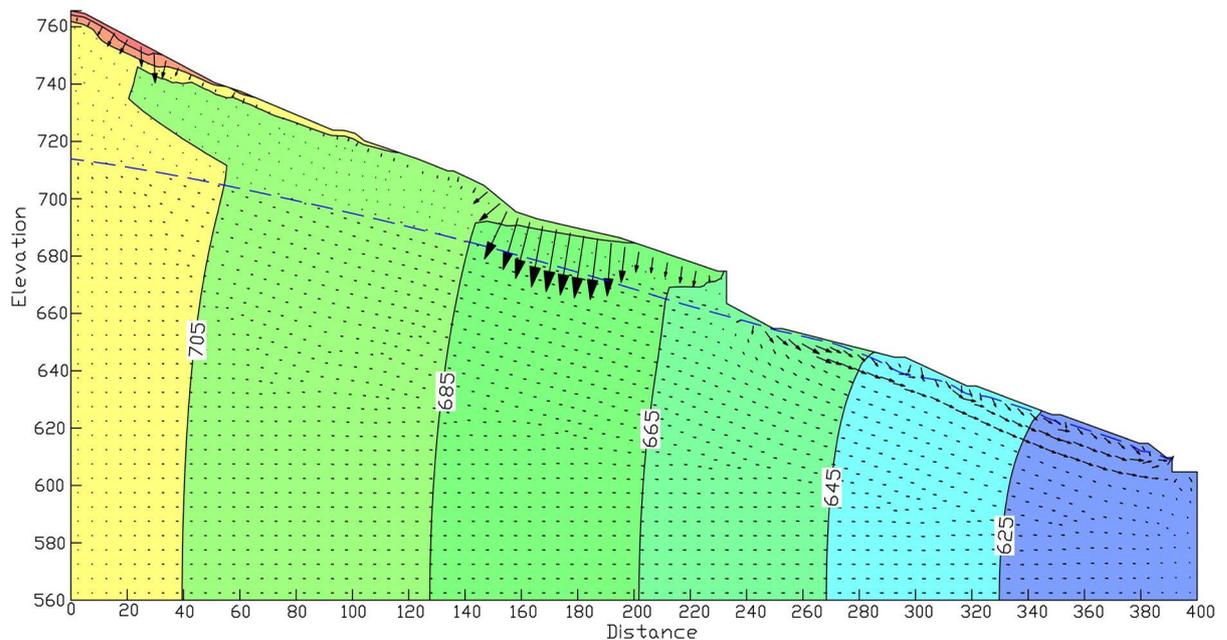


Figure 4. Seepage field after heavy rain in a section without drainage facilities

图 4. 某剖面无排水设施下暴雨后渗流场

通过研究查明了场地区域水文地质条件，掌握了场地裂隙富水带的空间分布，以及地下水补给、径流排泄特征，并通过模拟地下水渗流特征、开挖对地下水渗流的影响，评价了地下水对场地稳定性的影响，提出了截排地下水的工程处置措施，通过模拟表明采用“仰斜排水孔 + 集水井 + 渗沟排水方案”能有效的起到排水作用，为后续的加固治理实施提供了技术支撑。

3.3. 地震作用下边坡及场地稳定性分析

在 2008 年汶川大地震后，中国地震局将本工程场地设计基准地震动水平峰值加速度由原来 0.15 g 提

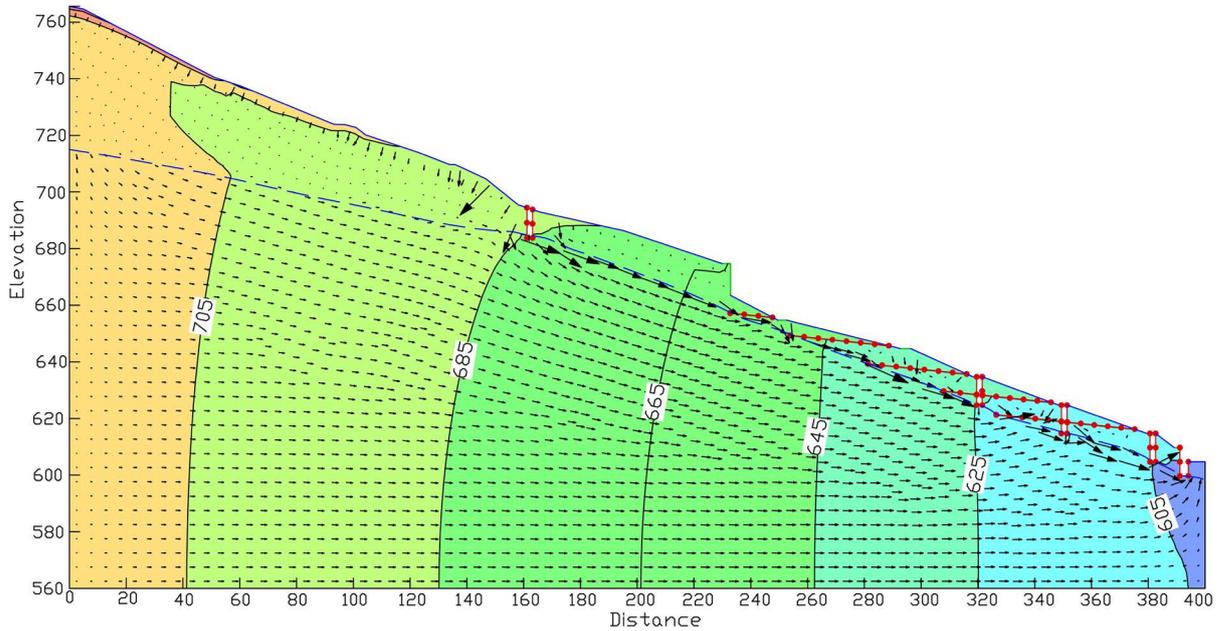


Figure 5. Seepage field after a heavy rain in a profile with inclined drainage hole + catchment well + infiltration ditch drainage scheme

图 5. 某剖面仰斜排水孔 + 集水井 + 渗沟排水方案暴雨后渗流场

高到 0.33 g，远大于前期场地稳定性评价所采用的地震动水平峰值加速度，存在抗震稳定性风险[6]。本工程利用大型振动台试验、离心振动台试验和数值分析的方法，对地震作用下典型边坡(2#滑坡)及场地的稳定性及加固措施进行了研究。

地震作用下边坡稳定性分析

为了能更准确的反映场区地震动的特点，本次振动台试验选用的天然波是 2008 年汶川地震中实测的清屏台站地震记录和 1940 年美国 El Centro 地震记录的 El Centro 地震波，人工波选用的是根据场地条件生成的人工地震波。试验过程中发现，试验边坡在饱水后，当遭遇 0.15 g 地震时坡脚处即开始出现溜塌现象。振动台试验中坡脚出现局部溜塌现象见图 6，0.15 g El Centro 地震波作用下水平位移见图 7，0.33 g El Centro 地震波作用下水平位移见图 8，加速度放大系数分布规律见图 9。



Figure 6. During the 0.15 g earthquake in the test, the toe of the slope collapsed locally (undisturbed slope)

图 6. 试验中 0.15 g 地震时坡脚出现局部溜塌(原状边坡)

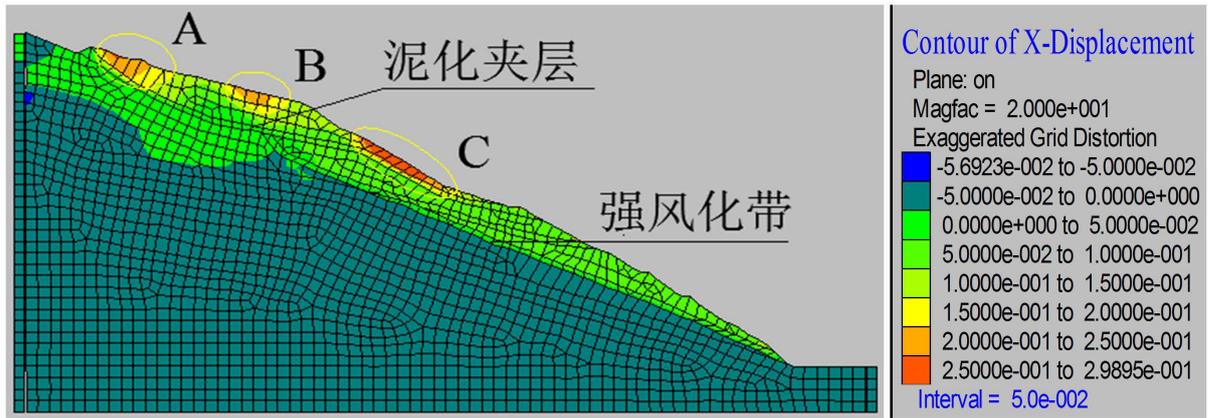


Figure 7. Horizontal displacement cloud image under the action of 0.15 g El Centro seismic wave (unit: m)
 图 7. 0.15 g El Centro 地震波作用下水平位移云图(单位: m)

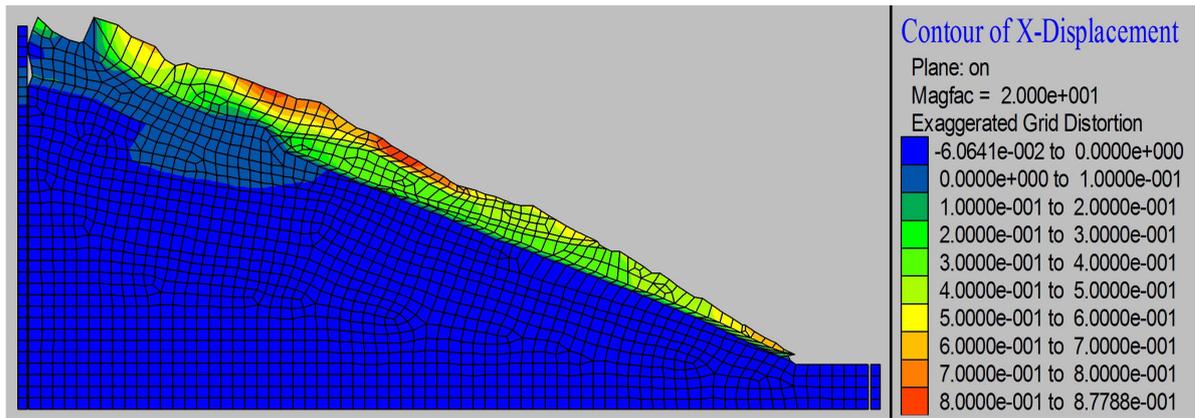


Figure 8. Horizontal displacement cloud image under the action of 0.33 g El Centro seismic wave (unit: m)
 图 8. 0.33 g El Centro 地震波作用下水平位移云图(单位: m)

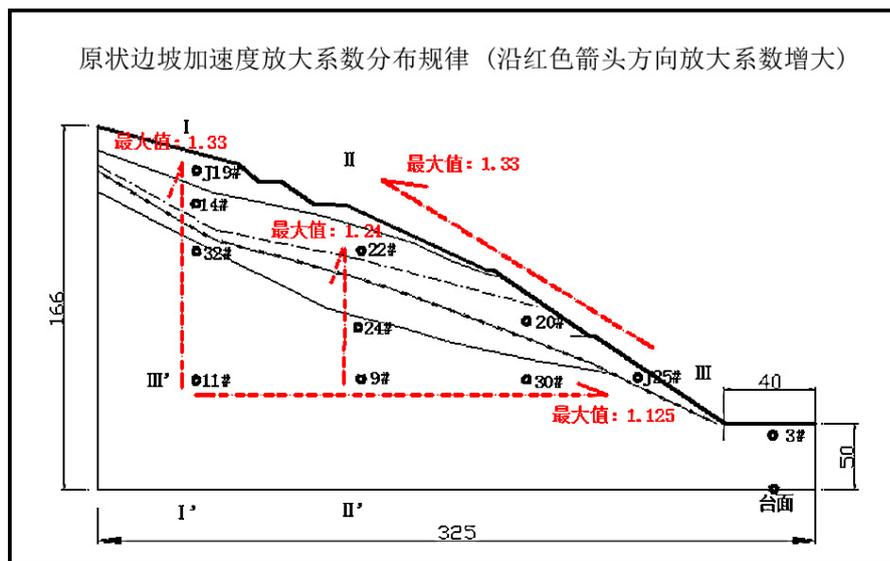


Figure 9. Summary of acceleration amplification coefficient distribution law summary of acceleration amplification coefficient distribution law summary
 图 9. 加速度放大系数分布规律汇总加速度放大系数分布规律汇总

3.4. 地震作用下场地稳定性分析

为了研究地震作用下场地的稳定性，本工程采用振动台试验和数值分析开展了地震作用下，具有断层或强风化带的场地整体稳定性及破坏模式研究。本文仅从数值模拟角度对降雨和地震联合作用下场地的动力响应进行叙述。本文数值模拟计算监测点布置见图 10，塑性应变见图 11，动力计算完成后的破坏状态见图 12。

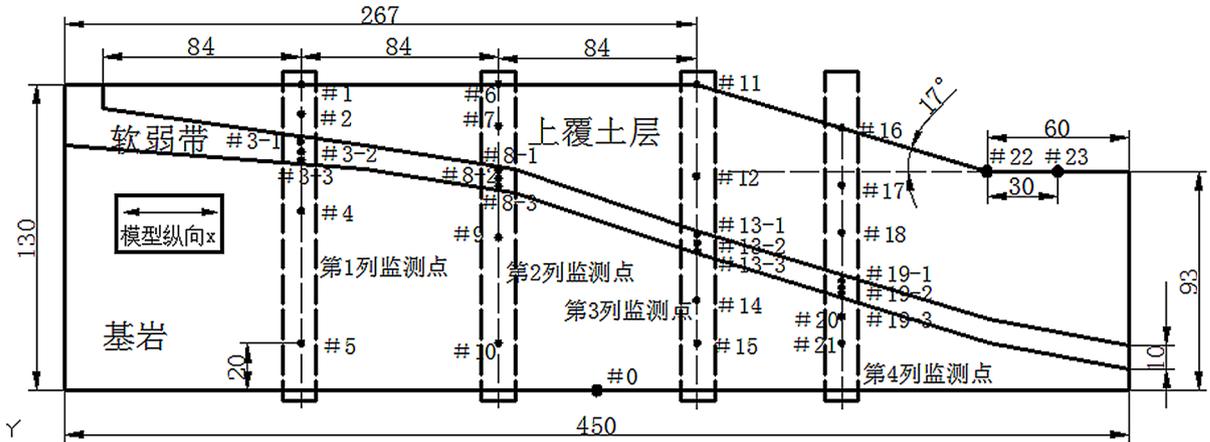


Figure 10. Schematic diagram of monitoring point layout
图 10. 监测点布置示意图

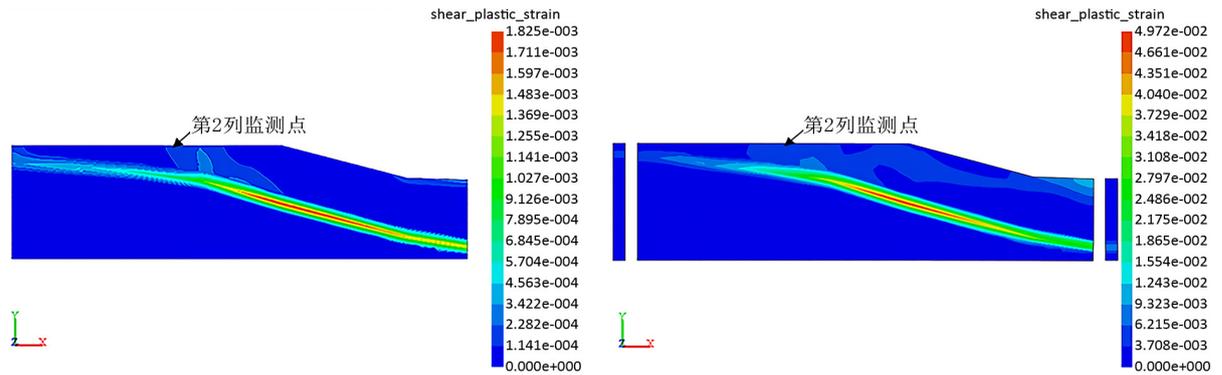


Figure 11. Plastic strain cloud diagram before (left) and after (right) dynamic calculation
图 11. 动力计算前(左)、后(右)塑性应变云图

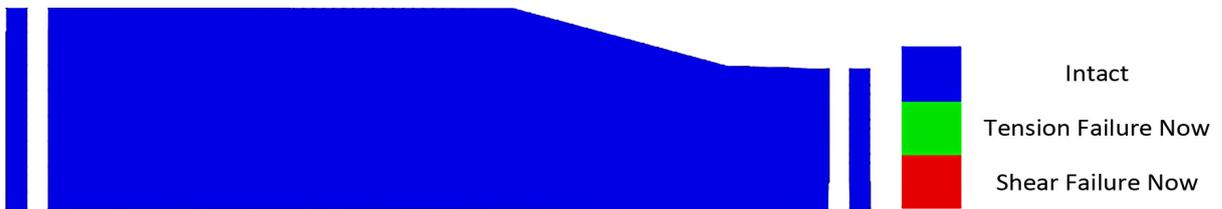


Figure 12. Schematic diagram of the failure state after the dynamic calculation is completed
图 12. 动力计算完成后的破坏状态示意图

4. 加固治理措施研究

4.1. 地震作用下边坡加固治理措施研究

本工程高边坡加固措施的确定经历了原状边坡→初步设想加固方案→最终加固方案三个阶段。2#滑

坡最终确定了双排抗滑桩加预应力锚索的加固方案，并利用振动台试验和数值分析对这一加固方案进行了验证，通过对地震作用下锚索轴力和桩背土压力的分析，验证了这一设计方案的安全性，并且基于锚索轴力监测方案，对边坡的加固设计提出了优化建议，提出了“分段设计”的方案，即根据边坡不同区域锚索轴力的响应差异性，对局部区域的锚索进行加强或弱化，以达到经济上的最优。

4.2. 地震作用下场地加固治理措施研究

通过原型场地的离心振动台试验和数值计算，本工程采用群桩对场地进行加固。通过分析群桩加固后场地的动力响应特性和塑性剪应变分布、位移和加速度响应以及下部桩的受力特性，研究群桩加固场地的稳定性。通过计算，结果显示群桩加固后的场地整体稳定性较好，但在场地边缘存在局部边坡失稳的可能，需要对场地的前缘边坡也进行加固，最终的加固治理方案：对场地采用群桩进行加固，对场地前缘边坡采用“桩板墙 + 坡面回填反压 + 抗滑桩 + 培土植草”进行加固治理。

4.3. 疏干场地地下水处理措施研究

根据边坡水文地质条件、地下水富水带分布、地下水对边坡稳定性影响程度、场地地形等因素，本研究提出三种地下水排水方案。

- 1) 方案一：边坡后缘廊道截排地下水；
- 2) 方案二：后缘地表截水 + 坡面截水 + 仰斜排水孔 + 集水井 + 渗沟(盲沟)；
- 3) 方案三：边坡后缘廊道截排地下水 + 场地廊道截排排水。

对场地及边坡范围内的渗流场进行数值分析，比较了三种地下水疏排水方案，提出了采用仰斜排水孔 + 集水井 + 渗沟排水的地下水处置方案。工程实施时应在后缘地表和坡面截水，减少地表水渗入。

5. 结论

本文对西南山区某重大工程所采用的多种技术及其在该工程中的应用进行了介绍，主要针对该工程采用数值分析、大型振动台模型试验、离心振动台模型试验等方法，在场地断层、软弱结构面对场地稳定性的影响，场地水文地质条件对场地稳定性影响、地震作用下边坡及场地稳定性分析、加固治理措施研究等方面的分析研究，进行了叙述。通过一系列技术手段，研究解决了该工程场地及边坡工程地质、水文地质和抗震安全方面的关键性技术问题，为工程的综合治理加固提供了技术支撑和科学指导。也由此可知，针对复杂工程科学问题，采用一般的工程勘察方法难以解决，而采用多技术融合的研究手段有助于破解工程科学难题。

参考文献

- [1] 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 等. 地震作用下边坡预应力锚索振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(A01): 2847-2854.
- [2] 朱森俊. 苗尾水电站右岸坝前边坡稳定性分析与加固治理[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [3] 吕群财. 土质边坡的稳定性分析与治理技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2014.
- [4] 李勇, 黄润秋. 龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂[J]. 工程地质学报, 2009(1): 3-18.
- [5] 谭超. 地下水对滑坡的力学作用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- [6] 张卢明, 周勇, 岳建国, 等. 川北地区龙马溪组页岩深层滑坡抗震稳定性及整治工程效果评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(4): 62-67.