

文章编号: 1674-599X(2020)02-0007-09

全强风化边坡破坏机理及加固措施研究

宋桂锋¹, 茶增云², 王庆龙², 乔文号^{3,4}, 梁栋才^{3,4}

(1. 云南小磨高速公路改扩建工程建设指挥部, 云南 景洪 666100; 2. 云南省交通投资建设集团有限公司, 云南 昆明 650028; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 中国科学院大学, 北京 100000)

摘 要: 针对热带雨林地区降雨量大、降雨集中的气候特点和风化作用强烈、风化程度深的岩性特征, 以小磨高速公路 K110+410 全强风化岩质边坡为例, 利用工程地质方法, 确定了上、下强风化岩层渗透性差异造成的不整合接触面为边坡滑动控制的地质模型; 利用有限元强度折减法, 模拟了边坡的开挖过程, 分析剪应变增量云图, 揭示并确定了边坡的变形破坏机制; 开挖是边坡失稳的主要因素, 降雨加剧了边坡的变形破坏。对于被动加固, 主动加固相具有设计参数高, 变形可控, 环境扰动小及加固工程量相对较小等优点; 经过对加固边坡工后 2 个雨季的安全监测, 证明了抗滑桩+锚杆组合加固的可靠性, 研究结果可为热带雨林区类似全强风化边坡防治提供技术支撑。

关键词: 热带雨林地区; 全强风化岩质边坡; 变形破坏机制; 主动加固; 被动加固

中图分类号: U418.5*2

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.002

Study on failure mechanism and reinforcement measure of completely weathered rock slope

SONG Gui-feng¹, CHA Zeng-yun², WANG Qing-long², QIAO Wen-hao^{3,4}, LIANG Dong-cai^{3,4}

(1. The Reconstruction and Extension Project Construction Headquarter of Yunnan Xiao-mo Expressway, Jinghong 666100, China; 2. Yunnan Communications Investment & Construction Group Co., Ltd., Kunming, 650028, China; 3. State Key Laboratory of Geo-mechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: In tropical rainforest area, the climatic is characterized by heavy and concentrated rainfall, the lithological is characterized by strong weathering and large weathering depth. In this study. According to the K110+410 fully weathered rock slope of Xiaomo expressway, the engineering geological method was used to determine geologic model of landslide surface that is located at the unconformity contact surface caused by the difference of permeability of the upper and lower strong weathered rock layers. The finite element strength reduction method was used to simulate the excavation process of the slope, and the strain incremental cloud map was analyzed to reveal the deformation and failure mechanism of slope; excavation is the main factor of slope instability, rainfall intensifies deformation and failure of slope. Comparing to the passive reinforcement, active reinforcement has the following advantages, such as high design parameters, controllable deformation, small environmental disturbance, and small quantity of reinforcement. The reliability of combined

收稿日期: 2019-03-18

基金项目: 云南省交通科技项目(云交科教[2016]163 号, 云交科教[2017]23 号); 交通运输部科技示范工程(2017-09)

作者简介: 宋桂锋(1975-), 男, 云南小磨高速公路改扩建工程建设指挥部高级工程师。

reinforcement of and anti-slide pile and bolt is certified by two rainy seasons monitoring of the reinforced slope. The results can provide technical support for reinforcement of full-strength weathering slope in the tropical rain forest.

Key words: tropical rain forest area; completely weathered rock slope; deformation and failure mechanism; active reinforcement; passive reinforcement

热带雨林地区独特的自然地理条件使得该区域气候影响带深度较大, 风化作用突出。全强风化岩质边坡的变形破坏机制相对特殊, 破坏具有明显的牵引特征。若处治不当, 给交通工程安全会带来极大的影响。因此, 亟需研究雨林区全强风化岩质边坡变形的破坏机制和工程处置技术。

目前, 针对全强风化岩质边坡的研究集中于 2 个方面: ①稳定性演化机理和破坏模式^[1-8]; ②不同的设计方法和加固防治措施^[9-13]。这些研究在一定程度上保证了相关工程的顺利实施, 但没有充分考虑边坡的地理要素、地质成因及主动与被动加固差异特征。

作者拟依托小磨高速公路建设中遇到的典型热带雨林区全强风化岩质边坡, 利用地质力学方法, 定性分析该类边坡的物理力学机制。根据初始地形和改变地形边坡的数值仿真试验, 揭示其变形破坏机理。基于安全 and 经济原则, 对比主动和被动加固措施的优、缺点, 为雨林区类似工程的安全控制提供技术支撑。

1 工程概况

1.1 工程简介

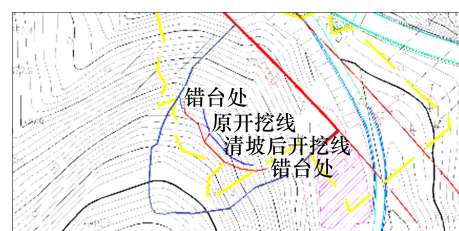
昆磨高速公路小勐养至磨憨段(简称为小磨高速公路)位于云南省西双版纳州景洪市勐腊县境内, 属于热带季风气候区, 平均年降雨量为 1 555.1 mm, 雨季(5~10 月)降雨量为 1 309.9 mm, 占年降雨量的 84.23%。强烈的风化作用造成全强风化层厚度较大, 开挖路段边坡问题突出。K110+410 边坡位于小磨高速线路右侧, 深挖方长度约 115 m, 中线最大挖深约 14.24 m, 形成边坡的最大高度约 48.6 m, 坡表为薄层第四系残坡积粉质黏土层, 下部为厚度较大的全强风化泥质粉砂岩, 再往下为中微风化泥质粉砂岩如图 1 所示。

1.2 全强风化岩质边坡稳定性的定性分析

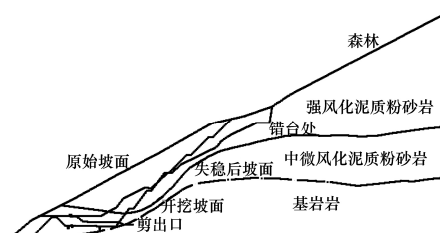
K110+410 路段边坡在下部台阶开挖过程中出现弧形变形裂缝, 相关单位组织专家对其进行调研

后, 提出了工程处理建议, 本课题组也对其进行了现场踏勘, 边坡概貌如图 2 所示。

在自然条件下, 斜坡处于稳定或略高于平衡状态, 坡脚通常是这些自然斜坡的重要阻滑段, 坡脚



(a) 平面地形图



(b) 剖面图

图 1 小磨高速公路 K110+410 路段典型全强风化岩质边坡

Fig. 1 Typical fully strong weathered rock slope of K110+410 section of Xiaomao Expressway



(a) 边坡全貌



(b) 现场取样

图 2 破坏边坡工程地质调查

Fig. 2 Slope engineering geological survey

开挖的工程扰动使得斜坡临空高度增加、抗滑力减小, 导致切坡后的斜坡产生变形。岩体裂隙扩张、结构发生变化使得强度发生弱化, 并且裂缝的扩展也使得降雨对边坡稳定性更为不利。

强风化砂砾岩孔隙发育, 富水性强; 强风化泥质粉砂岩孔隙性较差, 具相对隔水性。上部强风化砂砾岩中的地下水在强风化泥质粉砂岩顶部富集, 导致强风化泥质粉砂岩遇水强度急剧变低, 造成滑体滑动。滑动面多位于强风化砂砾岩与强风化泥质粉砂岩的不整合接触面位置。所以公路路堑的坡脚开挖是全强风化岩质边坡失稳的主要诱发因素, 而开挖后降雨尤其是强降雨的作用, 加剧了边坡的变形破坏。

2 全强风化岩质边坡的破坏机理

2.1 数值模型、计算参数和模拟工况

利用 Phase2D 软件, 考虑设计开挖条件下边坡稳定性的变形破坏机理, 采用强度折减法, 得到不同开挖步的安全系数。

利用 Geostudio2007 软件的 SEEP/W 模块, 在考虑西双版纳地区历史降雨资料的基础上, 设计了累积降雨量为 100 mm/(1 d), 100 mm/(10 h) 和 100 mm/(5 h) 3 种降雨强度和历时工况。采用非饱和非稳定渗流方法, 计算了降雨对 K110+410 初始和开挖改变地形过程中全强风化岩质边坡的渗流场变化情况。再将渗流场导入 SLOPE/W 模块, 通过计算, 找到流固耦合条件下的边坡稳定性演化规律。

计算所用岩土力学参数见表 1。有限元数值计算工况如图 3 所示。

表 1 边坡不同阶段岩体力学性质

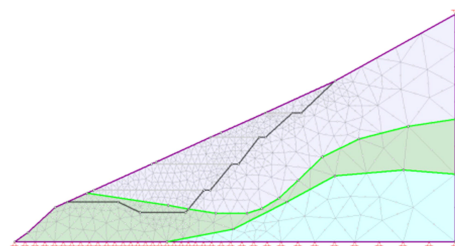
Table 1 Mechanical properties of rock mass at different

stages of slope

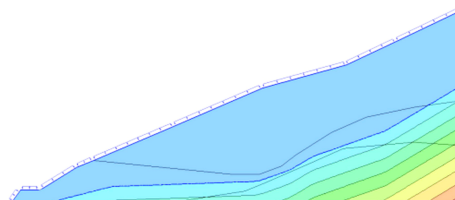
边坡发展阶段	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
自然坡	33	24
工程扰动	25	23
滑坡后	10	22
潜在强度下降(降雨)	8	21

2.2 考虑工程扰动影响的全强风化岩质边坡变形破坏机理

K110+410 边坡开挖分 5 步进行, 开挖过程中边坡安全系数演化曲线如图 4 所示。不同开挖步对



(a) 初始和改变地形工况



(b) 初始地形+降雨工况

图 3 有限元数值计算工况

Fig. 3 Finite element numerical calculation

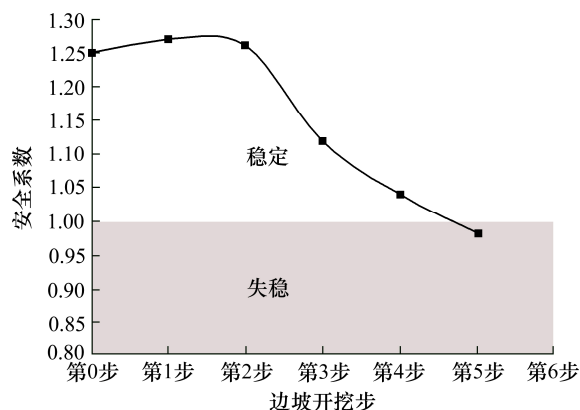


图 4 开挖过程中边坡安全系数演化曲线

Fig. 4 Slope safety factor evolution curve during excavation

应的剪应变增量云图如图 5 所示。该破坏模式在工程区具有一定的代表性, 利用剪应变增量云图, 揭示了开挖对边坡变形破坏的影响机制。

从图 4 中可以看出, 初始坡安全系数为 1.25。第 1 步边坡开挖期间, 由于卸荷减载, 边坡安全系数较自然坡的有所增加, 变形机制主要为回弹变形; 第 2 步边坡开挖期间, 安全系数微降; 第 3 步边坡开挖期间, 安全系数急剧下降, 降低至 1.12; 第 4 步边坡开挖期间, 安全系数降至 1.04, 边坡处于欠稳定状态; 第 5 步边坡开挖期间, 安全系数降至 0.98, 边坡失稳。

从图 5 中可以看出, 在边坡第 1 步边坡开挖后, 开挖面附近岩体已卸荷松弛变形, 对应的最大剪应变为 0.000 48; 第 2 步边坡开挖时, 以拉张塑性屈服为主, 对应的最大剪应变为 0.001 20; 第 3 步边

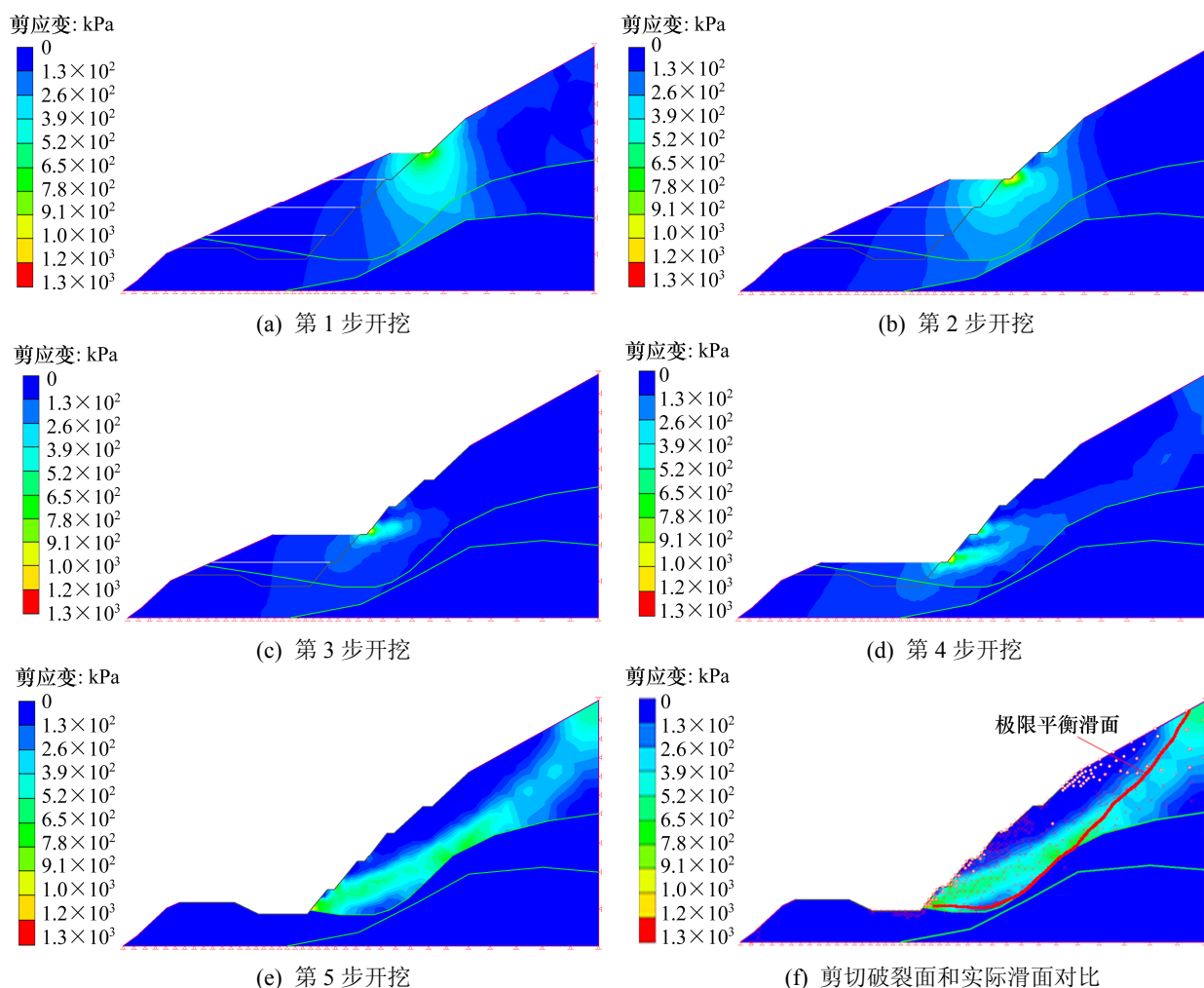


图 5 剪应变增量云图揭示的边坡变形破坏机制

Fig. 5 Slope deformation and failure mechanism revealed by shear strain incremental cloud

坡开挖的坡脚应力集中, 出现剪切塑性屈服, 对应的最大剪应变为 $0.004\ 80$; 第 4 步边坡开挖期间, 塑性区逐步向深部发展, 对应的最大剪应变 $0.191\ 00$; 第 5 步边坡开挖后, 剪切塑性区迅速贯通, 变形剧增并牵引后部斜坡松动变形, 坡体后缘表现为拉破坏, 边坡临近极限状态。

数值模拟中的剪切破坏带与实际滑动面的非常接近, 数值模拟中的拉破坏区与边坡破坏后坡顶的大量拉裂缝相对应, 证明了该类坡应该控制在 3~4 级。

2.3 考虑降雨影响的全强风化岩质边坡变形破坏机理

2.3.1 初始地形

在不同的降雨强度和历时条件下, 初始地形边坡对应的 4 个阶段的渗流场如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 当初期降雨强度大于强风化砂砾岩的渗透系数时, 坡体浅层会出现较少的暂态饱和区。随

着雨水不断入渗岩体, 其渗透性逐渐增加。随着时间的增加, 暂态饱和区继续向下移动, 接近地下水位, 使得地下水位随之升高。坡脚处地下水位距离地表最近, 故该水位响应最快。降雨结束后, 坡体内部渗流场仍然由上至下淋滤疏干。表明: 边坡整体稳定性仍受降雨影响。

从图 7 中可以看出, 随着降雨入渗的增加, 边坡稳定性逐渐下降, 在初期第 $20\ 000$ 秒, 降雨条件对其影响一致, 可认为是坡体的自然响应。随后, 降雨条件对其影响开始出现明显的不同。降雨强度越大, 对边坡的危害越大。表现为: 曲线降速快, 但最终的边坡安全系数还是一致的。

2.3.2 开挖改变地形

在不同降雨强度和历时条件下, 改变地形边坡对应的 4 个阶段的渗流场如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 边坡开挖后坡形的变化改变了地下水的渗流路径, 与自然坡降雨入渗的过程不同。开挖边坡

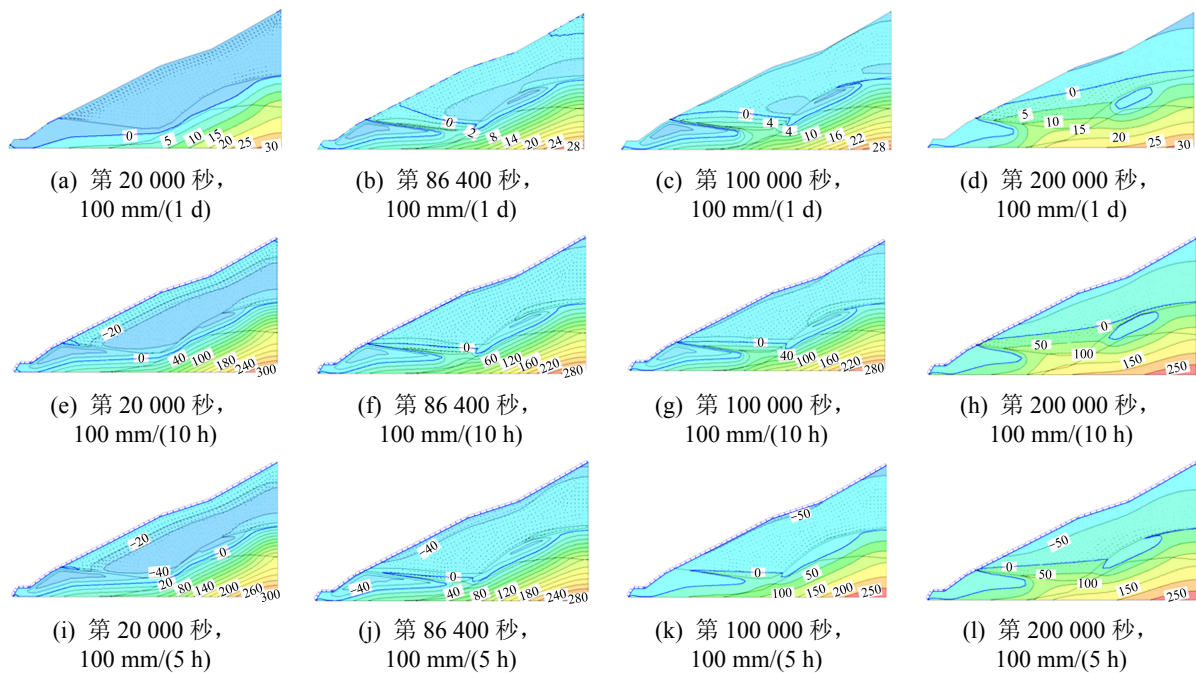


图 6 不同降雨强度和历时条件下初始地形边坡渗流场云图

Fig. 6 Cloud map of initial terrain slope seepage under different rainfall intensities and durations

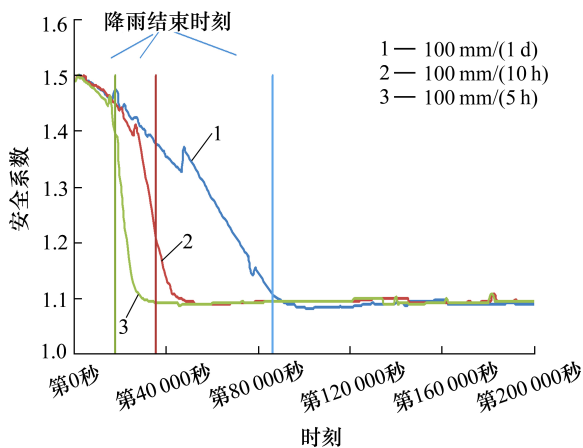


图 7 不同降雨条件下边坡安全系数演化曲线

Fig. 7 Evolution curve of safety factor of slope under different rainfall conditions

的降雨入渗表现: 随降雨时间的不断增加, 暂态饱和区逐渐向下移动并接近地下水位, 后缘的地下水位先抬升; 随着渗流场逐步调整, 坡脚处地下水位开始升高, 坡脚开挖导致坡脚处的浸润线较陡。渗流场的响应符合坡体的变性破坏影响机制, 后缘容易产生拉裂缝, 渗流场的表现也突出。

在降雨和工程扰动下, 边坡安全系数演化曲线如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 从降雨开始, 开挖边坡的安全性已经处于欠稳定状态, 降雨入渗立即造成坡体稳定状态急剧下降。降雨强度越大, 曲

线触底时间越短。之后, 边坡稳定性由于渗透场逐步疏干有所升高, 并趋于一致。所以该区边坡的破坏是由坡体全强风化造成的地质差异决定的, 开挖会造成不整合接触面的暴露, 降雨只是在此基础上引起坡体稳定状态的急剧下降。因此, 不整合接触面是加固的重点, 雨水的疏、排、截措施为辅助措施。

3 主动加固的工程应对措施和检验

3.1 主动和被动加固措施

主动和被动主要是涉及到一个时间点的问题, 其内涵与土压力主动和被动的含义类似。主动加固定义为先进行施工加固措施再开挖; 被动加固定义为开挖后再进行施工加固措施。它们的区别在于对边坡的变形控制效果和坡体力学性质劣化影响不同。主动加固为初始岩体参数, 被动加固为扰动劣化参数。

3.1.1 主动加固设计

K110+410 全强风化岩质变坡主动加固时, 内聚力取 33 kPa, 摩擦角为 24°, 将边坡设计为 5 级坡。采用抗滑桩加固, 坡面设置预应力锚索, 锚索细的部分代表自由段, 锚索粗的部分代表锚固段。锚索自上而下分布为: 35 m 3 排; 12 m 3 排; 35 m

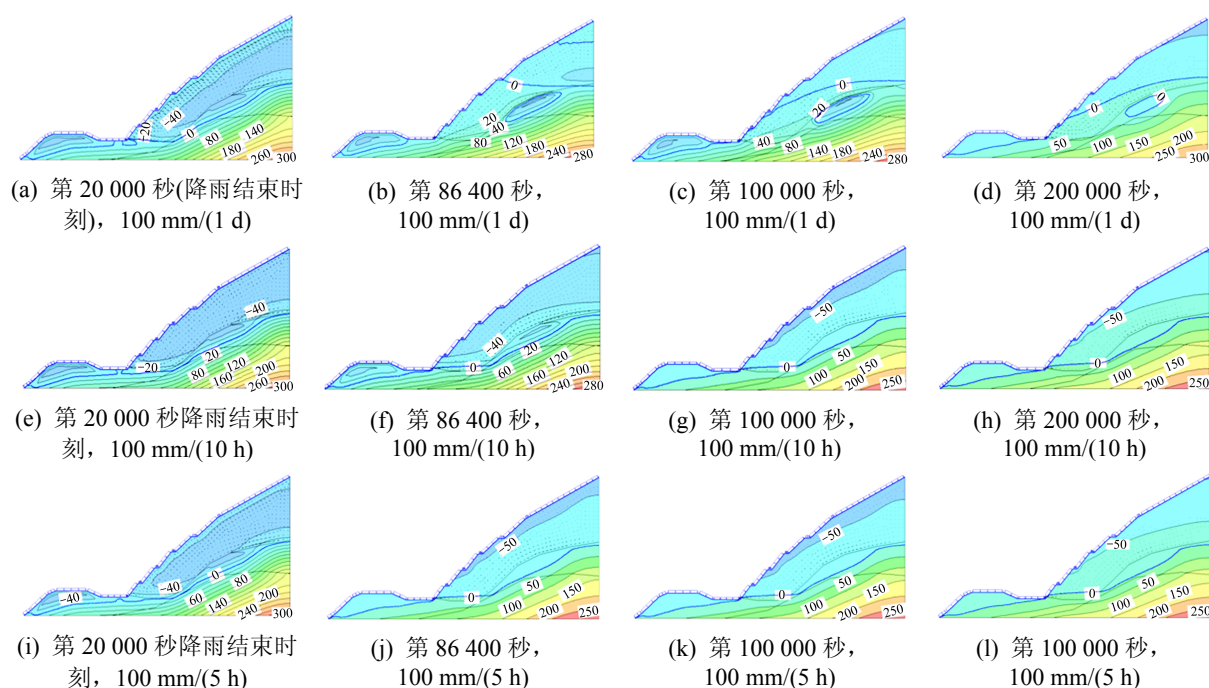


图8 不同降雨强度和历时条件下改变地形边坡渗流场云图

Fig.8 Seepage field cloud map under different rainfall intensities and durations

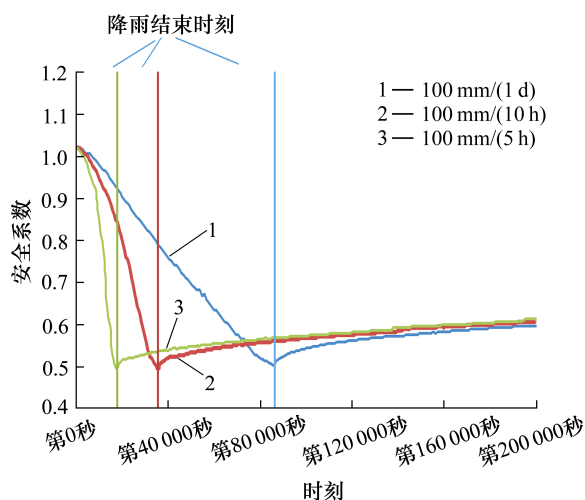


图9 在降雨和工程扰动下, 边坡安全系数演化曲线

Fig.9 Slope safety factor evolution curve under different rainfall and engineering disturbance

3排; 40 m 6排。加固设计断面如图10所示(表层放坡线)。

在第1级坡设置抗滑桩, 第2~5级坡设置锚索框架梁, 均为先进行施工加固措施再开挖, 或者开挖第1级坡后再开挖下1级坡, 第1~3级坡坡比为1:1.00, 第4~5级坡坡比为1:1.25, 每级坡马道和坡顶外侧设置截水沟, 第1级坡坡面处设置仰斜式排水孔。工程边坡在正常工况和非正常工况I下的稳定性系数分别为1.453和1.275, 满足正常工况下安

全系数大于1.2~1.3和非正常工况I下安全系数大于1.1~1.2的稳定性要求。

3.1.2 被动加固设计

若工程边坡开挖后没有及时采取加固措施, 而开挖扰动后岩体性质发生了较大幅度的下降, 开挖至第1级坡时, 边坡整体失稳。失稳后的补救措施为: 采取被动加固时, 边坡土体内聚力降为10 kPa, 摩擦角降为 22° , 将边坡设计为7级坡。首先对滑体部分削方减载, 并在第1级坡平台进行了抗滑桩施工。将第2~4级坡采用预应力锚索框架梁进行加固, 坡面为1:1.00的坡率整形。将第5级边坡采用8 m宽平台进行卸载并释放应力, 坡比为1:1.00。在第6~7级边坡设置锚杆和锚索框架梁进行加固, 坡比为1:0.75。其截排水措施与主动加固设计的一致。

3.2 加固措施优化

将主动和被动工程处治技术所用参数、设计坡率、加固工作量和土石方量进行了统计, 见表2。基于费效比原则, 进行了对比优化。

从表2中可以看出, 主动加固设计所选参数为坡体未扰动参数, 相对较高, 坡体施工过程中稳定, 工作量相对可控; 被动加固设计所用参数为坡体变形扰动劣化参数, 相对较低, 坡体施工过程中安全性不可控, 工作量相对不可控。若采用被动加固设

计，将会增加土石开挖方量，破坏自然坡植被，额外征用土地，延长工期，导致工程费用的显著增加。因此，对于该类边坡，采取主动工程处治技术相对可靠。

3.3 基于优化措施的加固边坡安全性和措施有效性的监测检验

为检验主动加固设计方法的可靠性，对优化加

固后的边坡进行稳定性监测。传感器布置如图 11 所示，下部用抗滑桩钢筋计监测(2 根桩)，中、上部用锚索应变计监测(2 孔锚索)。

为检验主动加固工程措施的有效性和加固边坡的安全性，对监控边坡进行了 1 a 的监测，监测数据如图 12 所示。

从图 12 中可以看出，钢筋计和应变计均在 2

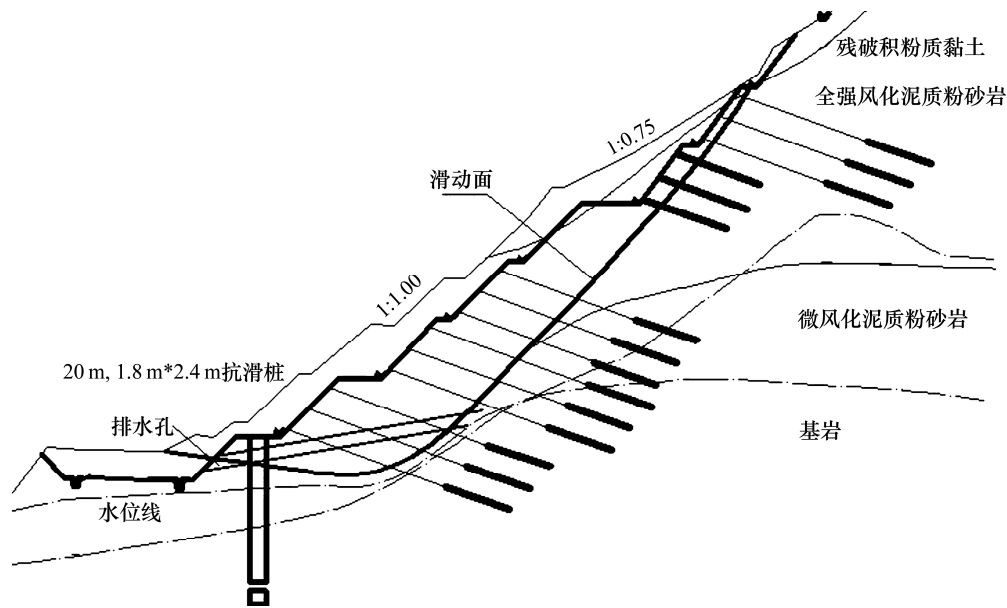


图 10 K110+410 边坡典型断面工程处治措施

Fig. 10 Treatment measures for typical section engineering of the K110+410 slope

表 2 主动和被动工程处治技术对比

Table 2 Active and passive engineering treatment technology comparison

加固类型	岩体设计参数		边坡设计	加固工作量	备注
	内聚力/kPa	摩擦角/(°)			
主动加固	33	24	5 级边坡	1 排抗滑桩锚索/杆框架	边坡稳定
被动加固	10	22	7 级边坡	1 排抗滑桩锚索/杆框架	边坡失稳，土方量增加，征地面积增加。

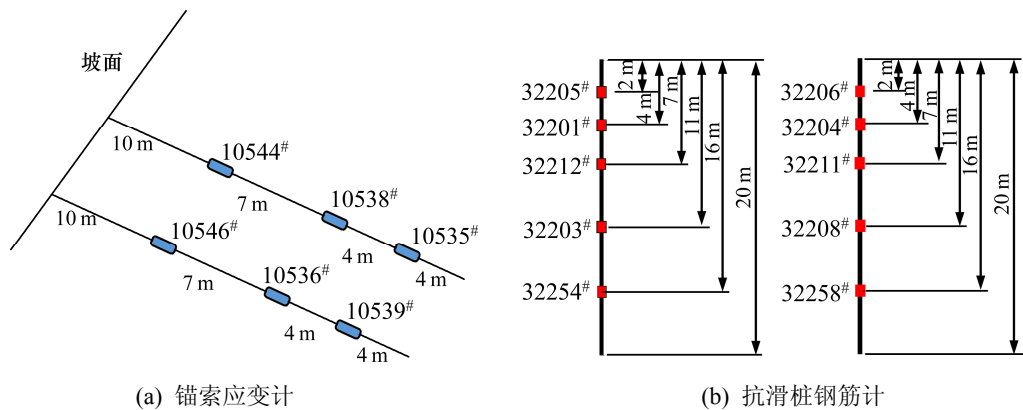


图 11 K110+410 边坡监测传感器布置示意

Fig. 11 Slope monitoring sensor layout for the K110+410 slope

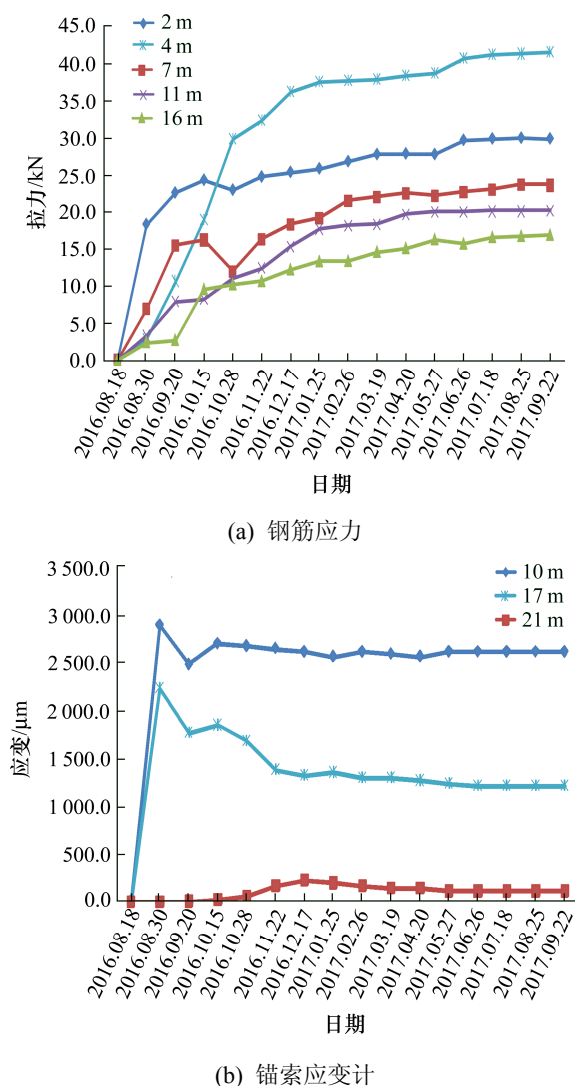


图 12 加固边坡监测曲线

Fig. 12 Monitoring curve of reinforced slope

个月后趋于稳定。加固后 15 d 内, 应力和应变的变化剧烈, 表明: 工程措施开始起作用了。2016 年 11 月以后, 钢筋受力趋于稳定。表明: 抗滑桩和岩体达到一个相对稳定的状态, 岩体变形得到了有效的控制, 抗滑桩工作状态正常。2016 年 11 月以后, 锚索应变测值趋于稳定, 这与抗滑桩钢筋拉力趋于稳定相一致, 自由段锚索拉力为 104~115 kN, 锚固段前段拉力为 44~46 kN, 锚固段后端拉力较小(仅为 4~9 kN)。表明: 锚索受力状态良好, 拉力较为均匀地分散到锚固段, 各钢绞线所受拉力相同, 锚固深度也满足要求。

1 a 的监测结果表明: 各类数据表现出较好的相关性, 抗滑桩和锚索框架均起到限制边坡变形发展的作用, 受力状态良好, 加固措施有效。

4 结论与建议

对热带雨林地区全强风化岩质边坡进行了现场调查和数值仿真分析, 得到其变形破坏机制。对比研究了主动和被动工程的应对措施, 得出的结论为:

1) 根据热带雨林地区全强风化岩质边坡工程地质分析, 上层强风化砂砾岩孔隙发育, 富水性强; 下层强风化泥质粉砂岩孔隙性较差, 具相对隔水性。滑动面多位于强风化砂砾岩与强风化泥质粉砂岩的不整合接触面位置。

2) 根据开挖改变地形下全强风化岩质边坡数值仿真分析, 公路路堑的坡脚开挖是全强风化岩质边坡失稳的主要控制因素, 而开挖后降雨尤其是强降雨的作用加剧了边坡的变形破坏。

3) 主动加固设计对边坡的变形扰动进行主动控制, 设计参数为自然参数, 环境扰动可控, 工程量相对较小; 被动加固设计对已产生问题或者变形边坡进行被动应对, 设计参数为扰动劣化参数, 环境扰动不可控, 工程量较大。该区边坡建议采用主动加固措施。

4) 经过对加固边坡的 2 个雨季的监测, 抗滑桩钢筋计监测的应力趋于稳定, 且远小于筋材强度, 桩体安全; 锚索应变计监测的应变趋于稳定, 锚岩系统协调承载, 证明工程措施合理, 坡体安全。抗滑桩+锚索组合加固措施可用于与该地区类似的高边坡设计。

参考文献(References):

- [1] 曹礼聪, 张建经, 刘飞成, 等. 含倾斜强风化带及局部边坡复杂场地的动力响应及破坏模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2238-2250. (CAO Li-cong, ZHANG Jian-jing, LIU Fei-cheng, et al. Dynamic response and failure mode of the complex site with tilting strongly weathered layer and local slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2238-2250. (in Chinese))
- [2] 周勇, 王旭日, 朱彦鹏, 等. 强风化软硬互层岩质高边坡监测与数值模拟[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2249-2258. (ZHOU Yong, WANG Xu-ri, ZHU Yan-peng, et al. Monitoring and numerical simulation of an interbedding

- high slope composed of soft and hard strong-weathered rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2249–2258.(in Chinese))
- [3] 曹烁.沿江强风化超高边坡工程施工保障技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017. (CAO Shuo. Research on Construction and support technology of high weathered slope engineering along the river[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.(in Chinese))
- [4] 王利军,熊立新.某公路强风化高边坡防护对策及数值验证[J]. 公路, 2016, 61(9): 112–116. (WANG Li-jun, XIONG Li-xin. Protection measures and numerical validation for the high slope with weathered soft rock[J]. Highway, 2016, 61(9): 112–116.(in Chinese))
- [5] 李大茂,张国辉,袁从华.基于数值仿真的全强风化岩质边坡失稳机制研究[J].水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 205–209. (LI Da-mao, ZHANG Guo-hui, YUAN Cong-hua. Numerical simulation of failure mechanism of fully-highly weathered rock slope[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(2): 205–209.(in Chinese))
- [6] 徐根洪.可靠性理论在强风化岩石边坡稳定性分析中的应用[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(3): 65–69, 74. (XU Gen-hong. Application of reliability analysis theory to stability analysis of highly weathered rock slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(3): 65–69, 74.(in Chinese))
- [7] 谭卓英,钟文,胡天寿,等.强风化岩质边坡软弱结构层EH-4 探测工程实例分析[J].金属矿山, 2013(10): 84–87, 92. (TAN Zhuo-ying, ZHONG Wen, HU Tian-shou, et al. Engineering case study of weak interface detection by EH-4 for highly weathered rock slope[J]. Metal Mine, 2013(10): 84–87, 92.(in Chinese))
- [8] 陆超.沿江强风化超高边坡施工稳定性演变机理及处治技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016. (LU Chao. Research on stability under construction and treatment technology of strongly weathered and super high slope along the river[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.(in Chinese))
- [9] 刘润,闫玥,闫澍旺,等.强风化岩质边坡滑坡治理及有限元分析[J].岩石力学与工程学报, 2006(S1): 2790–2794. (LIU Run, YAN Yue, YAN Shu-wang, et al. Improvement and finite element analysis of an intense weathering rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(S1): 2790–2794.(in Chinese))
- [10] 冯志秀,李大茂,袁从华,等.考虑岩体强度演化的全强风化岩质边坡主动加固设计方法[J].水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 124–127. (FENG Zhi-xiu, LI Da-mao, YUAN Cong-hua, et al. Active reinforcement method for highly weathered rock slope considering the evolution of rock mass strength[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(2): 124–127. (in Chinese))
- [11] 谭捍华,罗强,祁生文.全强风化岩高边坡破坏模式与加固效果分析[J].公路, 2007(12): 21–25. (TAN Han-hua, LUO Qiang, QI Sheng-wen. Dynamic optimum design of cut slope of south route in Jinan-Qingdao Expressway[J]. Highway, 2007(12): 21–25.(in Chinese))
- [12] 严捷.潮惠高速公路路堑边坡滑坡分析与治理[J].交通科学与工程, 2018, 34(2): 35–38. (YAN Jie. Analysis and control scheme of the slope landslide of the highway graben in Chaohui area[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(2): 35–38.(in Chinese))
- [13] 李世文.高速公路路堑高边坡稳定性分析及支护措施研究[J]. 公路工程, 2018, 43(5): 167–172. (LI Shi-wen. Stability analysis and support measures of cutting slope high side slope of expressway[J]. Highway Engineering, 2018, 43(5): 167–172.(in Chinese))