

# 鄂西山区高速公路深挖路堑高边坡稳定性研究

王国斌, 王红明

湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉  
Email: 332788683@qq.com

收稿日期: 2020年10月7日; 录用日期: 2020年10月23日; 发布日期: 2020年10月30日

## 摘要

以保神高速公路深挖路堑边坡工程为例, 通过FLAC<sup>3D</sup>有限差分法定量评价了深挖路堑边坡的稳定性和加锚支护后路堑边坡的稳定性。研究发现, 深挖路堑高边坡的稳定性系数为1.04, 处于欠稳定状态, 存在巨大安全隐患。采取植入锚索支护措施后, 边坡稳定性系数达到1.88, 边坡稳定性得到明显改善, 可满足工程安全要求。

## 关键词

路堑边坡, 分步开挖, 锚固支护, 边坡稳定性

# Study on the Stability of Deep Cut High Slope of Highway in Western Hubei Mountainous Area

Guobin Wang, Hongming Wang

Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd. in Hubei, Wuhan Hubei  
Email: 332788683@qq.com

Received: Oct. 7<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 23<sup>rd</sup>, 2020; published: Oct. 30<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Taking the deep cut slope engineering of Baoshen expressway as an example, the stability of the deep cut slope and the stability of the cut slope after anchor supporting are quantitatively evaluated by FLAC<sup>3D</sup> finite difference method. It is found that the stability coefficient of the deep cut high slope is 1.04, which is in an under-stable state and has a huge potential safety hazard. The

stability coefficient of the slope reaches 1.88 and the stability of the slope is obviously improved, which can meet the safety requirements of the project.

## Keywords

Cutting Slope, Excavation by Steps, Anchorage Support, Slope Stability

Copyright © 2020 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

随着我国大中城市基础设施逐步完善, 高速公路建设开始向西南山区推进。沿线地质灾害易发, 其中不稳定斜坡和开挖后的高陡边坡成为高速公路建设和运营的主要潜在威胁之一[1]。如若对沿线自然斜坡重视不足和防治不当, 当自然环境变化时, 极易发生不稳定斜坡灾害。如著名的丽水山体不稳定斜坡事件, 山体不稳定斜坡一直延伸至里东高速, 近二十栋建筑物被埋, 最终造成 34 人遇难。因而, 为保证高速公路安全建设与运营, 必须深入了解公路沿线的地形地貌、地质构造、岩土性质和气候水文等自然因素, 准确把握自然斜坡的形成机理以及开挖后的变形与稳定状态才能以此进行防治[2]。

针对公路边坡的稳定性评价研究已十分丰富。杨春风等[3]基于改进粒子群算法、最大熵方法和高维数据评价方法投影寻踪法(IPSO-MEPP)分析了深路堑边坡的不同影响因素对整体稳定性的影响效果和几类边坡的整体稳定性。赵健等[4]采用极射赤平投影法定性分析和 3DEC 离散元方法定量分析截断原支护结构的边坡稳定性和新增支护后新建铁塔的边坡稳定性。樊炼等[5]采用 FLAC<sup>3D</sup> 强度折减法和刚体极限平衡法对路堑边坡开挖过程的稳定性进行综合研究。骆伟等[6]通过有限差分法建立三维有限元模型, 分析了有无支护、分级开挖情况下边坡卸荷特征及可能出现失稳破坏的区域范围。何玉琼等[7]采用无限斜坡模型、瑞典条分法及极限平衡法计算分析降雨条件下斜坡的流向流量及稳定系数, 研究开挖前后的稳定性及预测水流冲刷严重的区域。廖军等[8]借助 Geo-studio 的 Seep/W 模块分析边坡在降雨作用下破题内部渗流场变化特征及瞬态稳定性。杨朝晖和王汉斌[9]采用离散元强度折减法对五孟高速公路边坡稳定性进行有效分析, 选择滑面位移统计值作为边坡失稳判据, 数值模拟结果与现场检测结果基本保持一致。因此, 公路路堑边坡的研究已成为当前工程地质学、土力学和岩体力学研究的热点和重要课题。现如今在公路边坡的理论、方法和技术等方面均取得了许多具有价值的科研成果。

本文以湖北鄂西山区某公路边坡为研究案例, 依据钻孔信息、大型原位剪切试验和原状土样室内试验综合确定滑动带以及相关力学参数, 基于 FLAC<sup>3D</sup> 研究边坡稳定性以及开挖与支护前后变形场演化规律, 为边坡的防治和公路建设提供工程依据。对于减少公路边坡对高速公路工程的威胁, 确保工程的顺利实施和安全运营具有重大的现实意义。

## 2. 工程概况

湖北省保康至神农架高速公路位于湖北省西部, 是湖北省“十二五”的“九纵五横三环”高速公路网规划和“鄂西生态文化旅游圈”建设的重要组成部分。本项目东连保康至宜昌高速, 西接神农架阳日镇 S307 省道, 是神农架林区与外界沟通联系的第一条高速公路, 途经保康县的马桥镇。项目起点位于襄阳市保康县后坪镇的前坪村, 与保宜高速公路相接, 由东至西经过保康县马桥镇, 终点为神农架林区阳日镇阳日湾村, 与 S307 省道对接。项目高速公路路线全长 43.63 km。

### 3. 边坡工程地质概况

拟建公路地处鄂西山地, 黄陵背斜东北部, 属秦巴山区东段。区内山谷相间, 地形连绵起伏, 山峰陡峻, 河谷深切, 多呈“V”型。沿线地形总体以分水岭为界, 两侧低中间高, 分水岭顶峰海拔高程在 1640.5 m, 线路起点高程最低为后坪镇约 484 m, 终点高程最低为马桥镇约 419 m。路线区地貌单元分为构造侵蚀堆积区、构造剥蚀-侵蚀区、构造剥蚀-溶蚀区等。HK-36 不稳定斜坡全貌与工程地质平面图见图 1, 图 2。

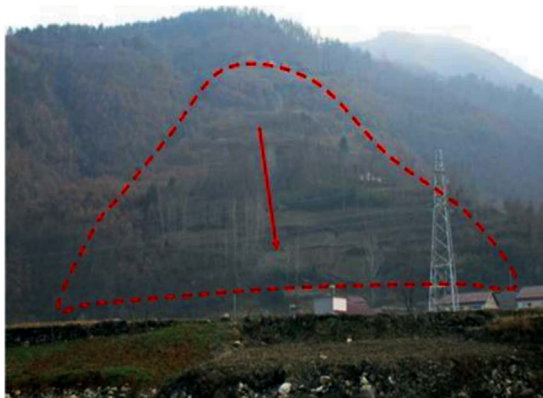


Figure 1. HK-36 unstable slope overall view  
图 1. HK-36 不稳定斜坡全貌

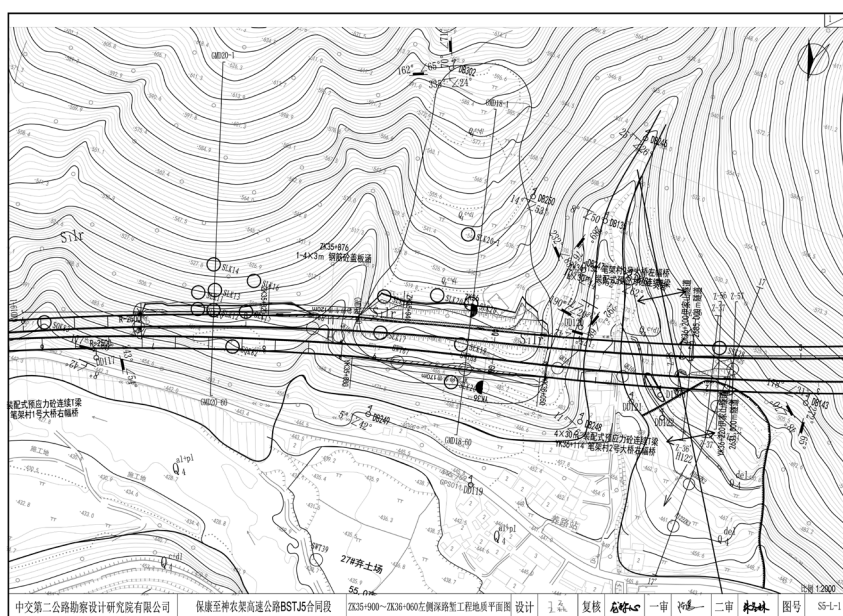


Figure 2. HK-36 unstable slope engineering geological layout plan  
图 2. HK-36 不稳定斜坡工程地质平面图

保神高速路段 ZK35+900~ZK36+060 路堑区穿越段位于 HK-36 不稳定斜坡堆积体内, 该不稳定斜坡堆积体平面呈“长条形”, 后缘高程约 600 m, 前缘高程约 485 m, 主轴向长约 270 m, 两侧平均宽约 115 m。不稳定斜坡堆积体两侧均为冲沟围切, 周界基岩出露。不稳定斜坡体上发育多级缓坡平台, 多被改造为旱地, 缓坡地形坡度约 10°~16°, 陡坡地段地形坡度一般为 20°~35°之间。根据钻孔揭露显示, 堆积体厚度约为 7.2~28.5 m。坡面主要为耕种地, 坡前为笔架村。该不稳定斜坡典型地质剖面如图 3 所示。

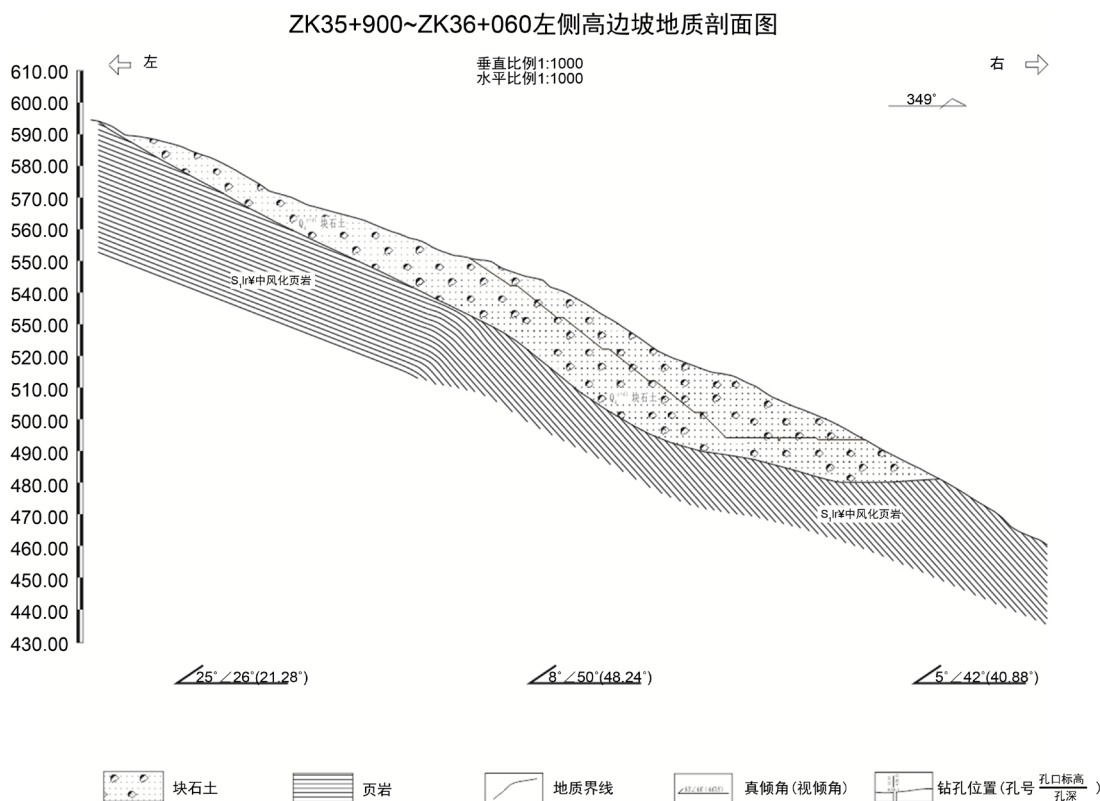


Figure 3. Typical engineering geological section of HK-36 unstable slope  
图 3. HK-36 不稳定斜坡典型工程地质剖面图

根据地质调绘和钻探揭露, HK-36 堆积体不稳定斜坡所处地层岩性如下所示:

第①层角砾土( $Q_4^{c+dl}$ ): 褐黄色, 中密~密实状, 稍湿。砾石含量约 40%~55%, 粘性土充填。仅 SLK19 号钻孔揭露厚度约为 4.1 m, 分布不均, 为边坡的软弱层, 力学性质较差。

第③-2 层碎块石( $Q_4^{c+dl}$ ): 灰褐色, 中密~密实状, 浅表稍湿, 碎石含量约 60~80%, 成分为页岩, 粒径约 4~20 cm, 粘土填充。钻孔揭露厚度约为 2.9~28.5 m, 力学性质一般。

第⑦-1 层强风化页岩( $S_{1lr}$ ): 灰褐色, 砂质结构, 岩体节理裂隙极发育, 岩体极破碎, 广泛分布于路基区, 力学性质一般。

第⑦-2 层中风化页岩( $S_{1lr}$ ): 深灰色、灰绿色, 砂质结构, 层状构造, 岩体节理裂隙发育, 岩芯多呈碎块状、柱状。广泛分布于路基区, 力学性质较好。

#### 4. 路堑边坡设计方案概况

根据高速公路路线设计方案, 需要对该段路堑进行台阶式放坡开挖, 路堑横断面设计如图 4 所示。

该段路堑边坡设计坡底高程为 494.5m, 宜需进行 6 级边坡分级开挖, 第 1 级边坡坡比为 1:1, 高度为 8m; 第 2 至第 5 级设计坡比 1:1.25, 高度为 10m; 第 6 级设计坡比为 1:1.5, 开挖至斜坡坡面, 高度为 8.87m。为保证开挖后路堑高边坡的稳定性, 工程上对各级边坡均采用锚杆框架进行防护。

#### 5. 稳定性研究

根据堆积体不稳定斜坡的工程地质条件与公路项目设计要求, 通过数值模拟研究 HK-36 堆积体不稳定斜坡在开挖加固后边坡自然与暴雨工况下的边坡稳定性状况以及变形演化规律。

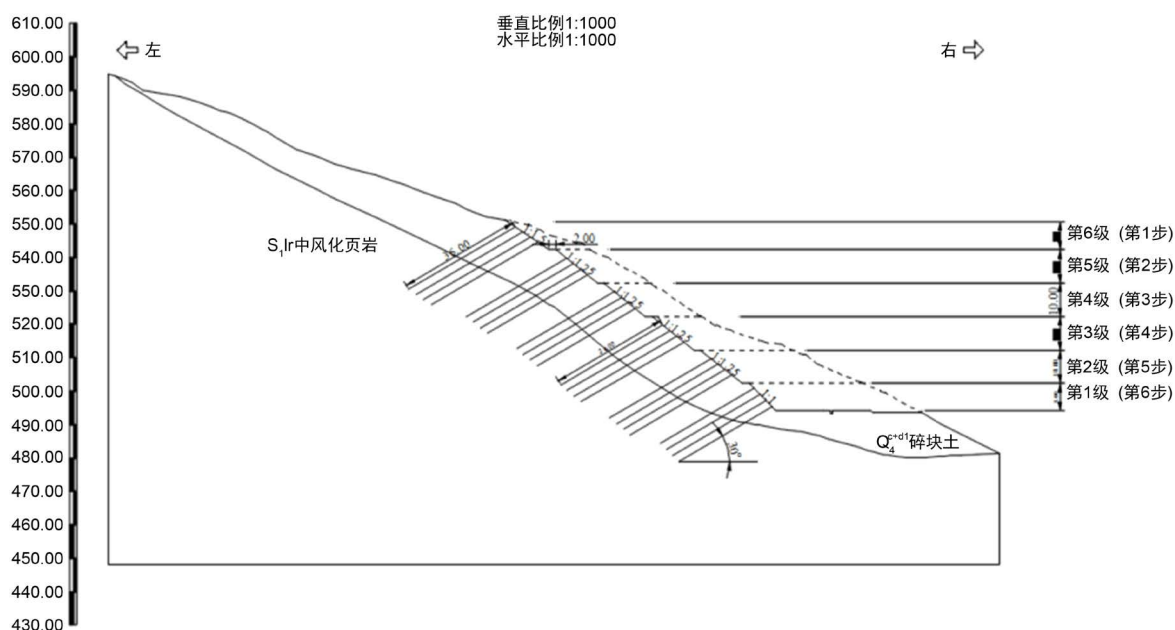


Figure 4. Excavation and support diagram of cutting slope  
图 4. 路堑边坡开挖与支护图

### 5.1. 模型建立

对堆积体不稳定斜坡的工程地质横断面图进行概化后, 建立如图 3 所示数值分析模型, 边坡尺寸为  $272.4 \text{ m} \times 146.8 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ , 其中组块 3~8 为分步开挖的 6 级坡体。借助国际通用软件 Ansys 进行前期处理建模, 采用三角形和四边形混合平面网格进行划分, 共划分 4142 个结点, 1970 个单元, 如图 5 所示。将模型的左右边界固定, 限制水平位移; 模型底部设定为固定边界, 同时限制水平和垂直位移; 坡面设定为自由边界。选择莫尔 - 库仑屈服条件作为弹塑性模型进行计算开挖与支护边坡坡体的应力应变; 采用强度折减法[10][11][12]计算边坡的稳定性。

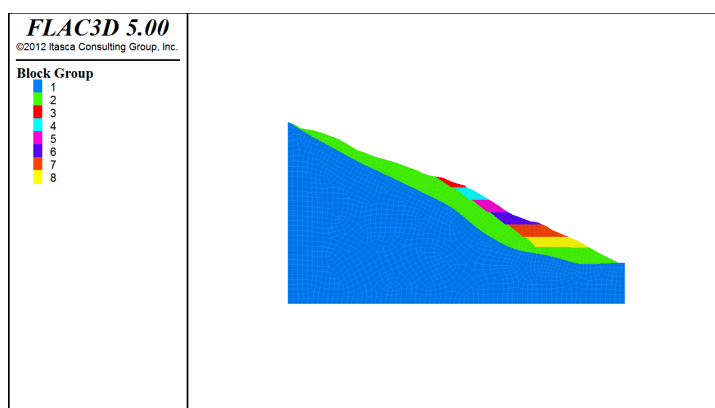


Figure 5. Numerical model of unstable slope of HK-36 accumulation body  
图 5. HK-36 堆积体不稳定斜坡数值模型

### 5.2. 路堑边坡开挖过程稳定性分析

采用  $\text{FLAC}^{3\text{D}}$  内嵌算法迭代模拟天然工况下该路堑边坡的开挖过程, 该过程并不进行锚固支护。未

开挖斜坡和不同开挖步的边坡稳定性计算分别如图 6 和图 7 所示。从图 6 和图 7(a)和图 7(b)可以发现, 进行第 1~2 步开挖形成台阶后, 剪应变增量带贯通整个边坡内部, 揭示了潜在滑移模式基本与开挖前一致, 基本沿碎石土层和基岩的界面下滑, 剪出口位于边坡右下角基岩露出处。统计稳定系数于表 1, 发现边坡的稳定性系数是逐步上升的, 这是由于削坡减载效应造成的, 即土层自重减轻, 土层的下滑力减小, 导致抗滑力与下滑力比值增大。继续向下开挖施工, 图 7(c)~(f)表明, 潜在滑移模式逐渐变成剪出口为该处开挖台阶坡脚的圆弧滑动。表 1 中显示边坡的稳定性系数逐渐降低, 当开挖完成后, 边坡的稳定性最低, 仅 1.04, 处于欠稳定状态, 极有可能失稳破坏, 亟需支护加固以确保设计边坡的稳定。造成这种现象的原因是, 设计边坡坡比比天然斜坡陡峭, 当开挖达到一定高度规模后, 继续向下开挖一方面时设计边坡的临空面逐渐加大, 下滑力上升; 另一方面丧失了坡脚前方土体的阻滑作用。两者作用下来便使得稳定系数降低。

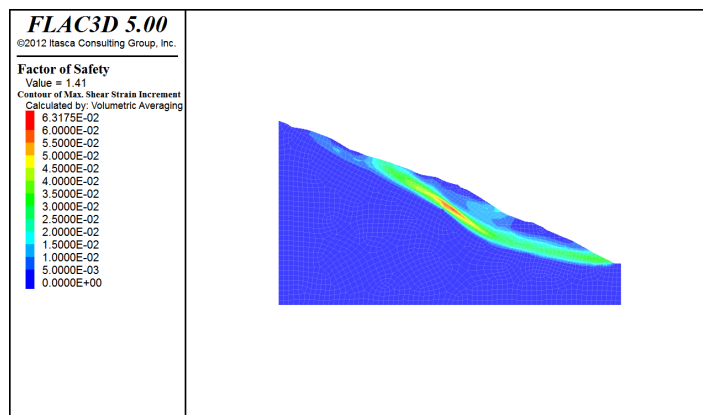
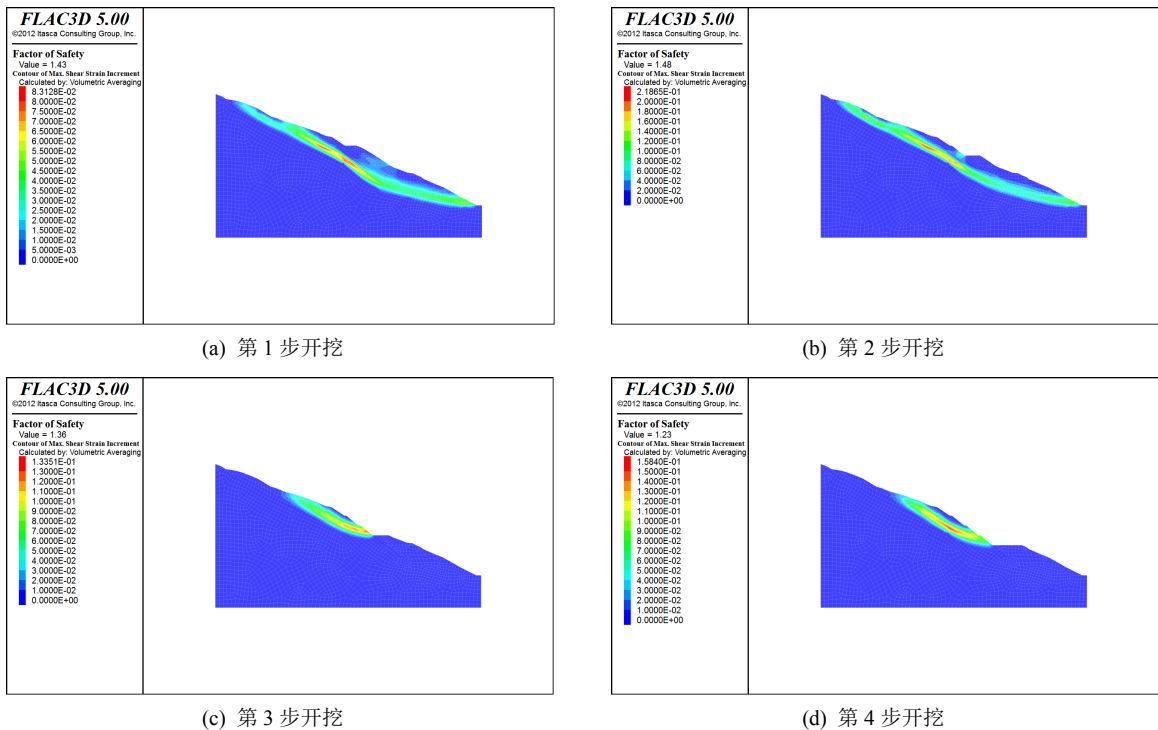


Figure 6. HK-36 unexcavated slope stability and strain increment calculation results  
图 6. HK-36 未开挖斜坡稳定性与应变增量计算结果



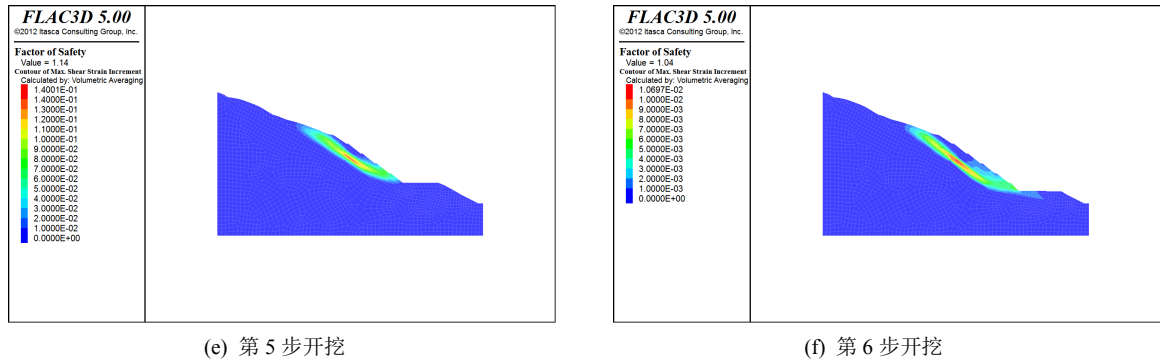


Figure 7. Calculation results of slope stability and strain increment in different excavation stages

图 7. 不同开挖步路堑边坡稳定性与应变增量计算结果

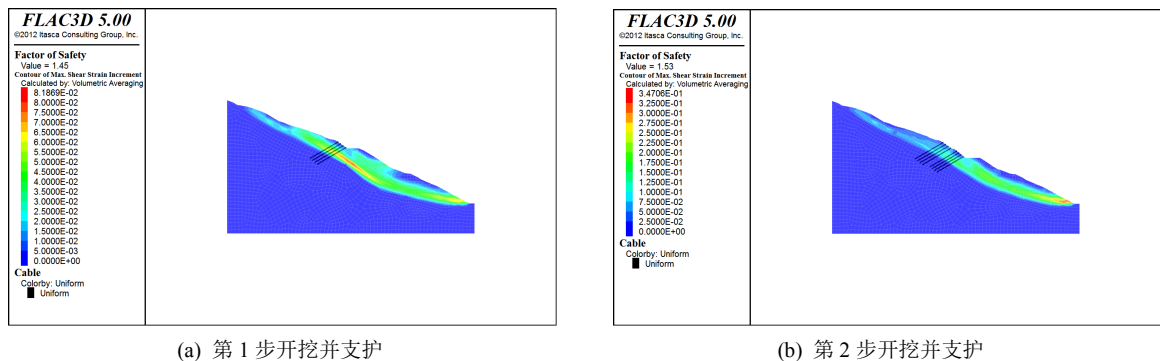
Table 1. HK-36 cut slope stability calculation results

表 1. HK-36 路堑边坡稳定性计算结果

施工工况	稳定性系数
HK-36 不稳定斜坡	1.41
边坡第 1 步开挖	1.43
边坡第 2 步开挖	1.48
边坡第 3 步开挖	1.36
边坡第 4 步开挖	1.23
边坡第 5 步开挖	1.14
边坡第 6 步开挖	1.04

### 5.3. 路堑边坡支护过程稳定性分析

采用 FLAC<sup>3D</sup> 内嵌算法迭代模拟天然工况下该路堑边坡的边开挖边支护的过程, 模拟结果见图 8。从图 8 中发现, 分析开挖过程设计边坡破坏模式发现, 边坡第 1~2 步开挖并支护台阶后, 其潜在滑移面与开挖不支护工况相似, 沿碎石土层和基岩界面下滑, 剪出口位于边坡右下角基岩露出处。继续向下进行第 5 步开挖后, 边坡破坏模式转变为圆弧滑动, 与开挖工况相比, 剪出口位置没有发生改变, 依然在基岩露出处, 但潜在滑坡上缘变为开挖底面平台。而当进行至第 6 步开挖后, 边坡产生滑坡的可能不再处于开挖的台阶任何一处, 而是转移至 HK-36 斜坡坡顶处, 此处的潜在滑移变形需要工作人员多加巡视监测。与只进行开挖的边坡稳定性系数进行对比并可视化, 见图 9, 发现边开挖边支护后的各级边坡稳定性系数均得到了提升, 最终整个设计边坡的稳定性系数达到 1.88。由此可见边坡稳定性得到了较大幅度的改善, 锚索加固效果良好。



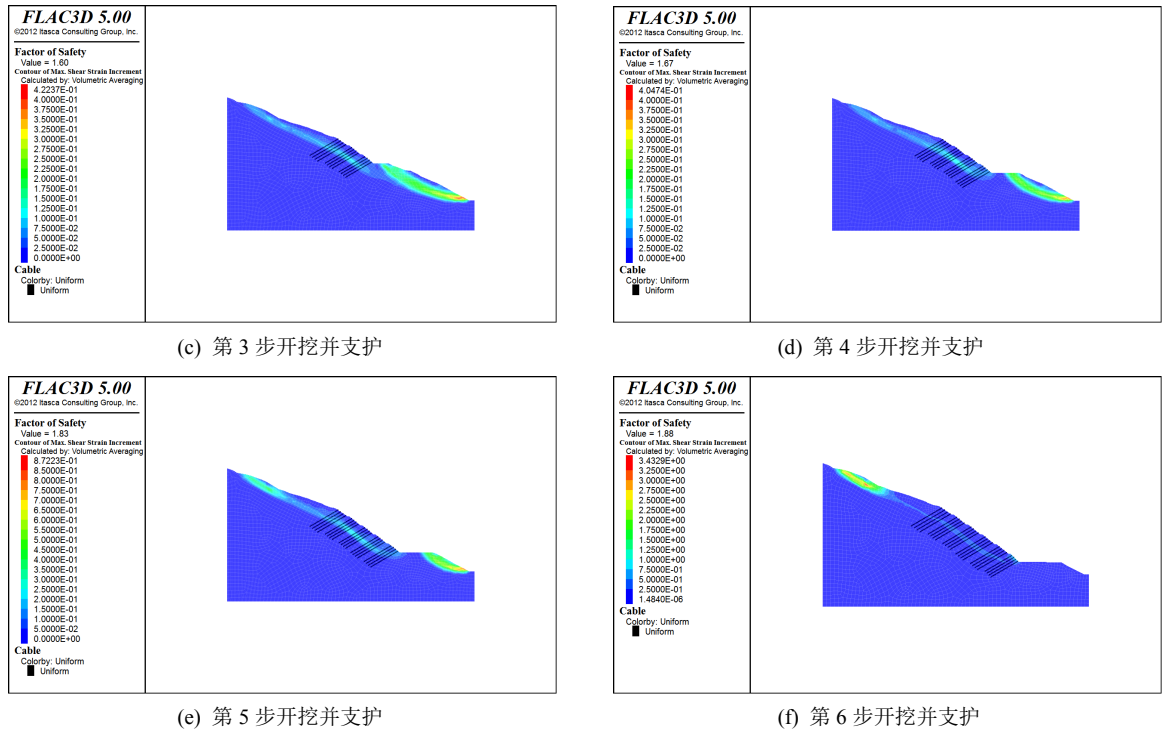


Figure 8. Calculation results of stability and strain increment of cutting slopes in different excavation stages  
 图 8. 不同开挖步路堑边坡支护时稳定性与应变增量计算结果

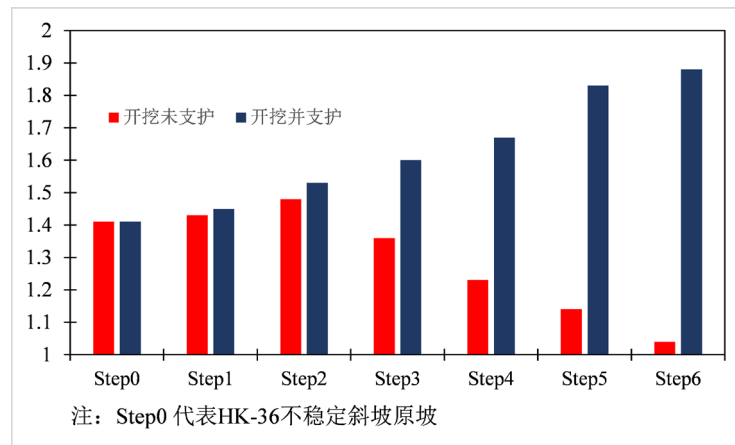


Figure 9. Comparison of stability before and after support of cutting slope  
 图 9. 路堑边坡支护前后稳定性对比

另外, 在暴雨工况下对边坡进行开挖支护模拟, 发现在支护完第 2 级边坡, 继续开挖第 1 级边坡后, 如图 10 所示, 虽然边坡整体稳定性达 1.44, 设计边坡已向坡脚方向滑移 19.2 cm, 若使锚索长期处于较大应变状态下, 后期极易发生断裂。这对边坡的稳定非常不利。因而在开挖和支护的整个施工过程应避免暴雨天气。若无法避开, 应提前做好防护措施。

### 5.4. 路堑边坡支护后稳定性分析

经 FLAC<sup>3D</sup> 对支护完成后的边坡进行模拟计算并示于图 11 可知该边坡在天然工况下的稳定系数达到 1.88, 最大变形位移为 1.23 cm, 主要表现为因开挖而造成应力释放, 坡体向上隆起变形。暴雨工况下的



稳定性系数为 1.62, 坡体最大变形位移为 7.01 cm, 方向沿坡面向下, 主要原因为暴雨天气下, 边坡土体力学性质恶化, 抗滑性能下降; 土体重度加大, 下滑力增大, 导致边坡稳定性下降, 变形加剧。由图 11 的剪应变增量来看, 边坡的潜在滑移面主要是位于 HK-36 不稳定斜坡的坡顶处。因此, 应多加注意此处的滑动, 建议对此处实行实时变形监测等措施, 一旦出现异常及时采取措施消除隐患。

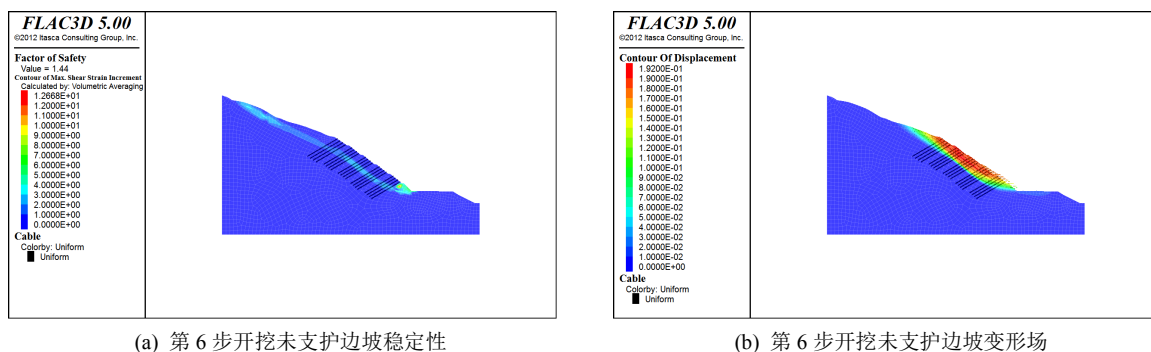


Figure 10. Calculation results of stability and deformation of cutting slope under heavy rain

图 10. 暴雨工况路堑边坡稳定性与变形计算结果

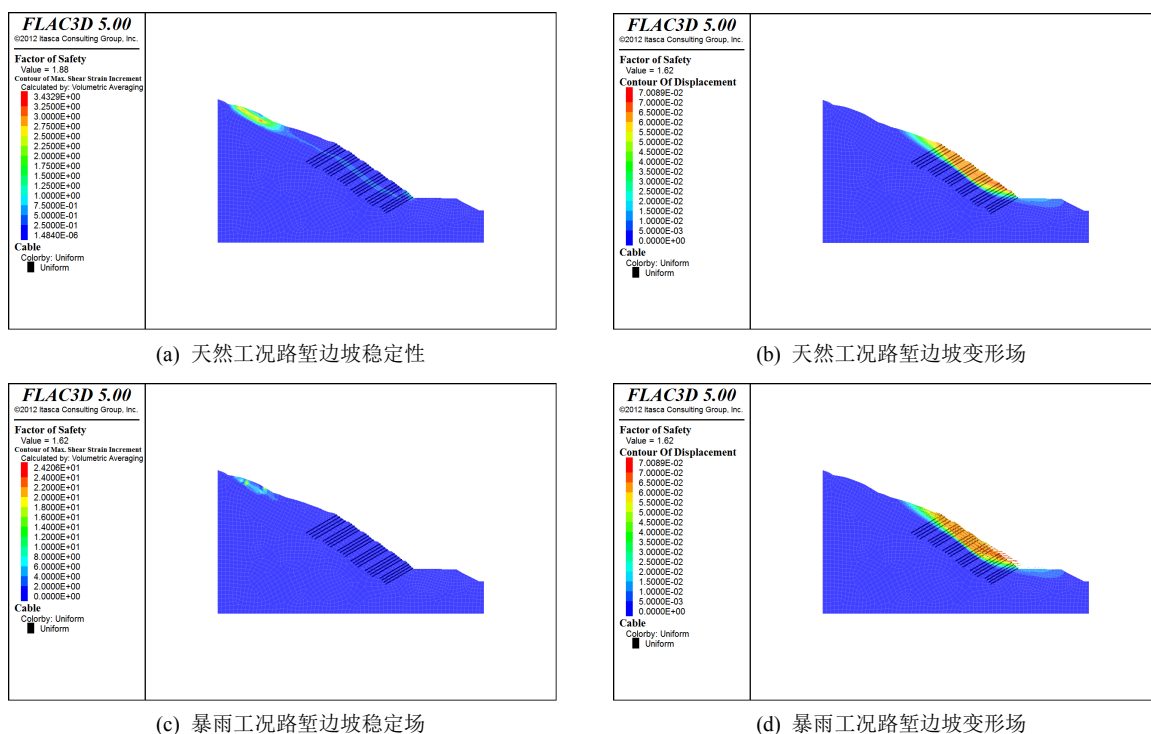


Figure 11. Calculation results of stability and deformation of cut slope after excavation and support

图 11. 开挖并支护后路堑边坡稳定性与变形计算结果

## 6. 结论

本文以湖北保神公路某路堑边坡为研究对象, 基于 FLAC<sup>3D</sup> 分析了湖北保神公路路堑边坡开挖与支护前后的边坡稳定性以及变形场演化规律, 研究发现表明若只进行开挖不支护, 边坡在开挖后期与暴雨工况下易形成滑坡, 需要采取边开挖边支护的工程加固措施。可以得到以下具体结论:

1) 通过边坡开挖的强度折减法分析, 在开挖(支护)第 5~6 级台阶时, 边坡的稳定性均有逐步增大的特征; 而开挖第 1~4 级台阶后, 边坡的稳定越来越低, 当全部开挖完成后, 稳定系数降至 1.04。表明在开挖过程中应及时进行支护以提高边坡的稳定性。

2) 采取边开挖边植入锚索支护的措施后, 边坡各开挖阶段的稳定性均得到了较大的改善, 同时位移也得到了较大的控制。暴雨工况下, 在开挖第 2 级台阶后边坡坡体发生了较大的位移。从长期来看这对边坡的稳定性非常不利。建议在天气良好情况下加快施工进度, 争取在雨天来临前完成施工。

3) 施工完成后, 天然和暴雨工况下边坡的稳定性系数分别达到了 1.88 和 1.67。位移也控制在了厘米级别, 说明锚索支护效果良好, 可满足工程安全性要求。边坡的潜在破裂面位于 HK-36 斜坡坡顶, 此处也应重点关注, 加强巡视监测。

## 基金项目

本研究得到科研项目——滑坡地质灾害防控与应急处置关键技术研究的资助, 为中南工程咨询设计集团有限公司资助的科研项目。

## 参考文献

- [1] 马惠民, 王恭先, 周德培. 山区高速公路高边坡病害防治实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [2] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 第二版. 北京: 地质出版社, 1994.
- [3] 杨春风, 吴浩, 白刚. 基于 IPSO-MEPP 的路堑高边坡稳定性评价与应用[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(3): 74-80.
- [4] 赵健, 杨立, 邓冬梅, 等. 基于 3DEC 对某输电线路新建铁塔岩质边坡的稳定性评价[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(2): 59-64.
- [5] 樊炼, 罗红明, 张安平, 等. 公路深挖路堑边坡稳定性综合研究[J]. 人民长江, 2018, 49(S2): 255-258.
- [6] 骆伟. 六武高速公路风化岩质边坡稳定性数值分析和防护设计[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [7] 何玉琼, 李春明, 杨兴华, 等. 降雨条件下公路边坡稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(10): 37-42.
- [8] 廖军, 龚洪苇, 石磊, 等. 降雨作用下近水平红层公路高边坡渗流场特征研究[J]. 水力发电, 2020, 46(10): 1-7.
- [9] 杨朝晖, 王汉斌. 基于离散元强度折减法的五孟高速公路边坡稳定性分析[J]. 桂林理工大学学报, 2020(3): 1-11.
- [10] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003, 34(1): 21-27.
- [11] 桂蕾, 殷坤龙, 翟月. 基于 FLAC3D 模拟和强度折减法的滑坡稳定性计算[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(6): 9-15.
- [12] 熊文林. 山区高速公路隧道洞口边坡稳定性的数值模拟[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(5): 108-112.