

# 基于 FLAC3D 的边坡稳定性及预应力锚索支护优化研究

姚一鸣

(昆明理工大学, 云南 昆明 650000)

**摘要:** 以云南省镇康县某土质边坡为工程背景, 通过数值模拟分析边坡的稳定性及滑动趋势。分析预应力锚索初步锚固方案, 并在此基础上分析垂直间距和倾角对边坡稳定性的影响。结果表明: 边坡处于临界状态, 发生牵引式滑动; 提出初步支护设计方案, 并优化了锚固设计; 当锚索垂直间距为 2-3m, 倾角为 20°-30° 时, 对边坡最有利。

**关键词:** 边坡稳定性; 预应力锚索; 锚固优化; 稳定性系数; FLAC3D

**中图分类号:** U418.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7973 (2022) 12-0111-03

从上个世纪 60 年代开始<sup>[1]</sup>, 有人采用数值方法进行边坡的应力分析。美国 Itasca 公司也推出了 FLAC3D 被运用于边坡动力变化分析中, 目前广泛应用于边坡稳定性系数和变形特征研究中<sup>[2]</sup>。

而预应力锚索支护技术是目前边坡加固的常见技术之一, 对边坡有着良好的支护效果<sup>[3]</sup>。

本文采用 FLAC3D 对马鞍山小学边坡进行稳定性分析, 研究边坡稳定性并提出基于预应力锚索的锚固初步支护设计方案, 并对初步设计方案进行优化, 探索不同因素对边坡支护效果的影响。

## 1 基本概况

### 1.1 基本特征及 H1-1 滑坡周界特征

马鞍山小学滑坡(图 1)总体平面形态呈不规则的舌型, H1 滑坡已发生下滑, 总体坡向 310°。滑坡体宽约 20m, 斜长约 42m, 前后缘地形高差约 21m。滑

坡后缘为高约 2.0-5.0m 的土质陡坎, 坡度近于直立。在其后缘形成一次级滑坡体 H1-1, 平均地形坡度约 32°, 主滑方向 310°, 主轴长 34m, 宽约 20m, 面积约 480m<sup>2</sup>, 前后缘地形高差约 24m。主要地层有为第四系残坡积层, 石炭系中上统泥质粉砂岩。

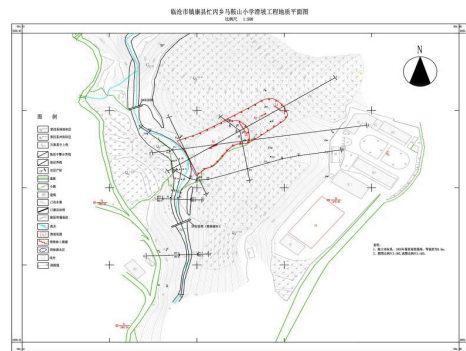


图 1 工程地质平面图

从各工位的负荷率可见, 通过在正面焊工位配置 2 套埋弧焊设备, 使得埋弧焊工位的节拍时间可满足单班 3 片板架(即节拍 140 分钟内)的要求, 解决了该工位的节拍瓶颈问题。而纵骨装配工位符合率较高的问题可以通过增加人员来解决, 不成为节拍瓶颈。

## 2 总结

在规划生产线时, 企业必须参与其中, 以自身生产对象的特点与企业现有工艺及设备情况, 并借助设计公司的经验规划符合企业发展方向的生产线。工位策划时, 一般越是大型的专业化生产设备, 越是难以要求其根据特定要求调整改变, 其局限性也越大。因此要实现生产线的柔性化生产, 可能须舍弃大型设备, 采用工装与设

备相结合的方式, 通过适量的人工干预方可。工位生产节拍与工位设备配置是紧密相关的, 策划时, 调整设备配置方案后须重新验证工位节拍。

### 参考文献:

- [1] 应潮龙, 张孔群. 平面分段生产线的设计[J]. 造船技术, 1995(2): 12-14.
- [2] 章桂宝. 船体平面分段流水线应用研究成果鉴定[J]. 造船技术, 1997(11): 11.
- [3] 张宇. 平面分段流水线的优化及其最佳效能研究[D]. 大连理工大学, 2008.
- [4] 刘旭东, 费利明. 平面流水线设计在海工半潜平台产品建造中的应用[J]. 船舶标准化工程师, 2015(4): 16-22.

根据地形地貌及台坎、地表开裂的位置来确定滑坡周界，前缘为高陡临空面，地形地貌可以为滑坡的滑动提供临空面和剪出口，判定为滑坡前缘。滑坡后缘茶地中出现多条裂缝，判定为滑坡后缘。

### 1.2 现状及发展趋势

根据现场调查访问，H1 滑坡目前处于稳定状态。而 H1 滑坡后缘的陡坎自稳能力较差，若不进行工程治理，可能导致其后缘茶地次级滑坡体 H1-1 产生牵引式滑动，因此对该边坡进行加固处置。

## 2 稳定性分析

本次数值模拟计算采用 FLAC3D。根据土工试验结果确定土体物理力学参数见表 1。

表 1 边坡数值模型参数

岩土体名称	密度(kg/m <sup>3</sup> )	体积模量(GPa)	剪切模量(GPa)	粘聚力(Kpa)	内摩擦角(°)
1	1950	3	2	32	10
2	1850	2.7	1.8	19.8	9.15
3	2280	5.3	4.7	1000	22

计算选取滑坡中部一典型剖面进行计算。图 2 为该边坡的现状模型。1 为粘土 1，2 为粘土 2，3 为泥质粉砂岩。

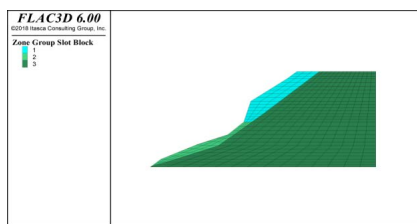


图 2 边坡建模图

经过计算，H1-1 稳定性系数为 1.028，处于临界稳定状态。结合图 3 临界状态其与现场边坡局部失稳状态一致。

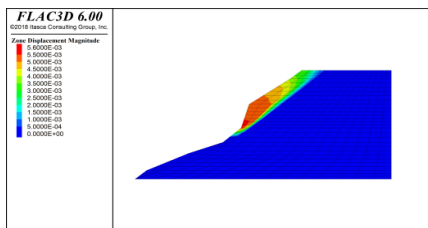


图 3 边坡合位移云图

## 3 预应力锚索支护及优化设计

### 3.1 支护设计方案

采用预应力锚索对边坡进行支护。锚索自由端长度为 6-12m，锚固段长度为 4m，垂直间距为 2m，锚索倾角为 35°。根据建筑边坡工程技术规范，对预应力锚索

的材料及构造进行设计。锚索杆体采用无粘结钢绞线，AST-MA416-87a 标准 270 级钢绞线，根数 1x7，直径  $\Phi$  为 15.24mm。钻孔孔径为 150mm。水泥浆选用普通硅酸盐水泥，灰砂比 1.2，水灰比 0.4。自锚索孔底一次性压满水泥浆，自由端采用防护油、塑料管隔离。锚索设计拉张力为 800KN。

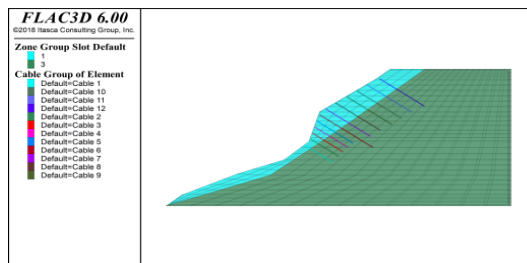


图 4 边坡支护模型

如图 5 所示，计算锚固后的边坡临界状态，在初步设计方案锚固下，边坡的稳定性系数为 1.33，处于稳定状态且满足相关规范要求。

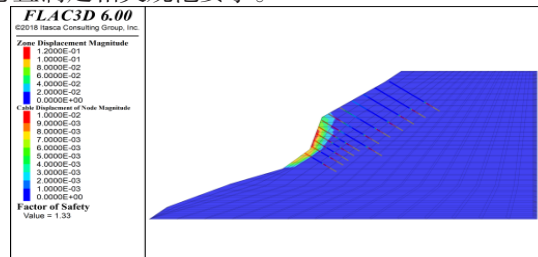
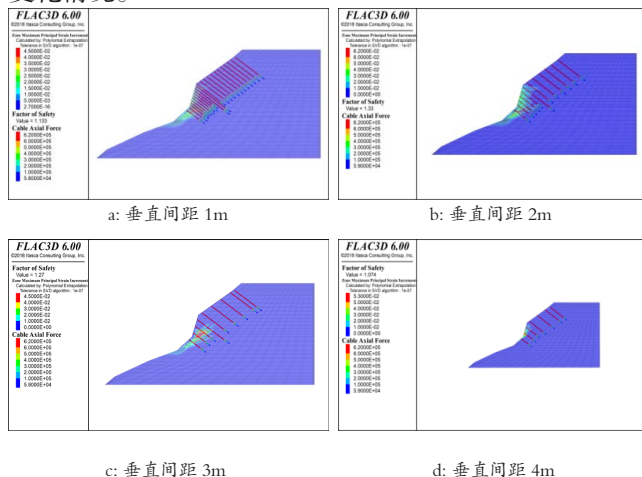
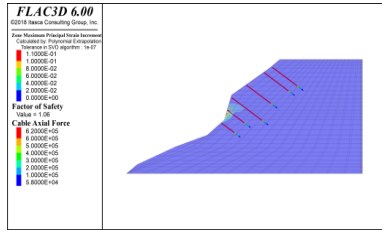


图 5 锚固边坡临界状态

### 3.2 预应力锚索垂直间距对边坡稳定性的影响

预应力锚索支护的初步设计方案，极大地提高了 H1-1 边坡的稳定性。但其结构设计仍然存在优化的可能性。本次优化设计主要考虑：预应力锚索垂直间距及锚索倾角两个方面。首先如下图 6、表 2，调整预应力锚索垂直间距，分别为：1m、2m、3m、4m、5m。建立相应的优化模型，计算其临界状态，分析边坡稳定性变化情况。





e: 垂直间距 5m

图6 垂直间距对边坡稳定性的影响

表2 预应力锚索垂直间距优化设计

垂直间距/m	1	2	3	4	5
稳定性系数	1.133	1.33	1.27	1.074	1.06

如图7所示,垂直间距对边坡的稳定性影响存在临界状态。当垂直间距为2m时,安全系数达到最大。

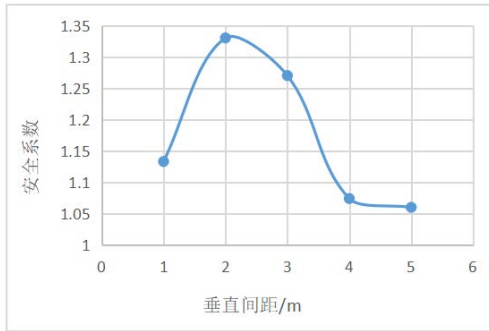


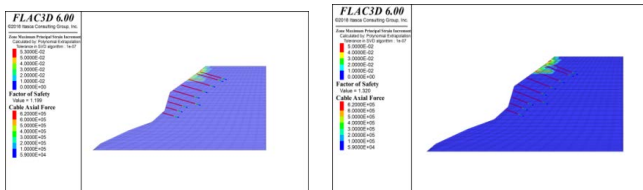
图7 锚索垂直间距与边坡安全系数的关系

### 3.3 预应力锚索倾角对边坡稳定性的影响

探究预应力锚索倾角的变化对边坡安全系数的影响。如图8所示,拟采用垂直间距为3m,建立边坡支护倾角优化模型,调整预应力锚索倾角分别为:15°、20°、25°、30°、35°。分析不同倾角对于边坡稳定性的影响。如下表3所示。

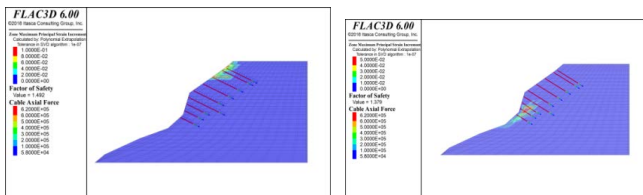
表3 预应力锚索倾角优化设计

倾角/°	15	20	25	30	35
稳定性系数	1.199	1.32	1.492	1.379	1.27



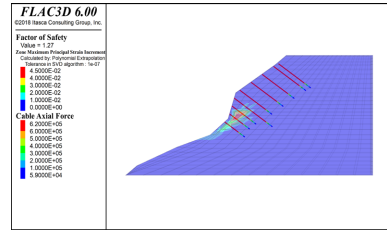
a:15°

b:20°



c:25°

d:30°



e:35°

图8 倾角对边坡稳定性的影响

如图9所示,当倾角变化为30°、25°时,边坡的安全系数大幅增加。

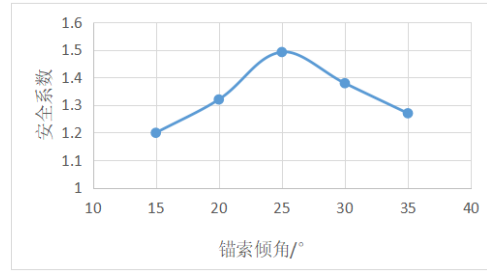


图9 锚索倾角与边坡安全系数的关系

对预应力锚索的初步设计方案优化设计:垂直间距调整为3m,倾角调整为25°。支护后的边坡稳定性系数为1.49。优化后不仅提高了边坡的稳定性,还极大地降低了成本。

### 4 结论

- (1) 在自然工况下,边坡的稳定性系数为1.028,边坡处于失稳状态。且模拟结果与实际调查结果一致。
- (2) 提出了预应力锚索的初步支护设计方案。支护后边坡处于稳定状态,安全系数为1.33。
- (3) 在该边坡支护中,当锚索垂直间距为2-3m,倾角为20°-30°时,对边坡最有利。

### 参考文献:

[1] 付雪,石磊,林建国,等.基于FLAC<sup>3</sup>(3D)的土质边坡稳定性分析[J].地下水,2021,43(1):2.

[2] 郭璇,赵成刚,等.非饱和土边坡稳定的安全分析与进展[J].中国安全科学学报.2005.15(1):14-18.

[3] Itasca Consulting Group Inc.FLAC3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D mensions ),version 21,users manual [Z]. Itasca Consulting Group Inc.2002.