

文章编号: 1673-9469 (2019) 01-0006-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.01.002

## 资兴高速 K21 段顺层岩质边坡支护过程数值模拟研究

党于航, 苏生瑞

(长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054)

**摘要:** 以资兴高速 K21 段顺层岩质边坡为研究对象, 借助现场调查、数值模拟研究段边坡的开挖和支护过程, 对各阶段的稳定性、位移、应力等的变化规律进行分析, 验证了开挖、支护设计的合理性以及边坡加固的安全性, 研究了边坡在开挖支护过程中应力应变规律。结果表明, 顺层岩质边坡开挖扰动开挖破坏了边坡原有的应力分布, 导致岩体产生裂隙损伤和变形, 并逐渐扩张, 弱化岩体和层面自身的强度。同时, 边坡开挖, 直接破坏了边坡原有的连续受力体系, 由于软弱层面的抗剪强度较低, 从而导致岩层沿开挖揭露的软弱层面整体下滑。锚索框架一方面通过对坡体的位移的控制作用, 增加坡体的稳定性, 另一方面通过预应力锚索把层状岩体锚固在一起, 使得各层之间摩阻力增大, 内应力和挠度大为减少, 大大提高了层面的抗剪强度。

**关键词:** 顺层岩质边坡; 软弱层面; 数值模拟; 锚索

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

## Numerical Simulation of Supporting Process of Zixing highway K21 Slope Bedding Rock Slope

DANG Yuhang, SU Shengrui

(School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Taking the high-grade K21 segmental rock slope in Zixing Expressway as the research object, a numerical model is built on the typical slope in the study area to simulate the excavation and supporting process of the slope by using on-site investigations, numerical simulation methods. Its stability, displacement, stress and strain features under different excavation and supporting are analyzed and summarized. The rationality of the excavation and support design and the safety of the slope reinforcement are verified. The stress-strain laws of the slope in the excavation and support process are analyzed. The results show that the main manifestation of disturbance in excavation of bedding rock slope is that the excavation destroys the original stress distribution of the slope, causes cracks and deformations in the rock mass and gradually expands, and weakens the strength of the rock and its stratum. Simultaneously, the open-cut cutting of the rock slope produces a free surface and directly destroys the original continuous force system of the slope. Due to the low shear strength of the weak layer, the overall rock formations slide along the weak structural surface which exposed by slope excavation. On one hand, the anchor cable frame increases the stability of the slope by controlling the displacement of the slope body. On the other hand, the layered rock mass is anchored together by the prestressed anchor cable, so that the frictional resistance between the layers increases. The stress and deflection are greatly reduced, which improves the shear strength of the layer greatly.

**Key words:** bedding rock slope; weak bedding surface; numerical simulation; anchor

收稿日期: 2018-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41877247), 国家自然科学基金资助项目(41502278)

作者简介: 党于航(1994-), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 从事地质灾害防治方向的研究。

资兴高速位于桂北地区，在 K21 段处穿过大面积的硅质岩单面山顺层边坡<sup>[1]</sup>。由于对此类边坡的失稳机理、工程特性等认识不足，已造成了大量的斜坡灾害<sup>[2-4]</sup>。谷德振、陈从新等人<sup>[5-9]</sup>从力学和结构面特征方面分析了顺层岩质边坡的失稳、破坏机理，并建立了相应的物理模型。孙红月等<sup>[10-12]</sup>分析了不同破坏模式的顺层岩质边坡中各因素对其稳定性的影响。本文通过模拟研究段边坡的开挖和支护过程各个阶段的稳定性、位移、应力等的变化规律，分析开挖支护过程中边坡的破坏机理和锚索格构在不同施工阶段的应力特征。为以后顺层岩质边坡开挖的支护设计方案提供经验，具有理论和实践意义。

### 1 边坡概况

研究路段位于资兴高速 K21 段边坡，K21+700 为山地地貌，线路走向与单面山基本一致。主要出露两种岩性，第四系坡积物以粉质粘土为主，分布于坡体表面，棕红色，黑灰色，厚 1 ~ 2 m，含 2 ~ 20 mm 的砾石约占 20% ~ 30%，硬塑震旦系硅质岩，成分以石英为主，岩质坚硬，节理裂隙发育，中风化，岩层产状为 276° ∠ 28°，发育两组结构面：  
① 294° ∠ 20°，间距 5 ~ 100 cm，平直，有擦痕，微张，  
② 210° ∠ 75°，间距 50 cm，平直（如表 1）。

表 1 结构面产状  
Tab.1 Orientation of structure plane

| 编号 | 结构面名称 | 倾向 /° | 倾角 /° |
|----|-------|-------|-------|
| P  | 层面    | 276   | 28    |
| J1 | 节理 1  | 294   | 20    |
| J2 | 节理 2  | 210   | 75    |
| B  | 设计坡面  | 276   | 70    |

### 2 边坡支护方案

#### 2.1 稳定性评价

选取研究区 K21+700 处的典型断面作为分析对象，边坡断面简图见图 1，根据现场调查与分析，天然状态下边坡潜在滑移面在图中①线段层面处，②线段为设计开挖面，将沿该部分从上至下进行第一次开挖和第二次开挖，③线段分别为两次开挖后的潜在滑移面。

天然条件下边坡稳定系数 1.51，处于稳定状态，第一级开挖后边坡稳定系数 1.49，略减小，第二级

开挖后稳定系数降为 1.07，稳定性急剧降低，若无支护，在降雨等外界情况下极易发生失稳破坏。

#### 2.2 研究区边坡支护方案

研究区 K21+700 硅质岩顺层路堑边坡支护方案如下：



(1) 边坡开挖坡率为 1 : 0.3，每 15 m 高设为一级开挖，各级之间设置 2 m 宽向外倾斜 4% 的边坡平台，平台上设置截水沟；

(2) 在各级开挖斜面上使用预应力锚索框架加固，锚索每隔 3 米布置一道，锚索横向间距也为 3 m，锚索倾角为 20°，锚索长度 15 ~ 35 m 不等，锚固长度为 8 ~ 10 m；

(3) 锚索采用 6Φ15.2 锚索，锚固力为 686 kN，张拉锁定值为 780 kN。锚索钻孔孔径为 130 mm，锚墩采用现浇或者预制并预留注浆孔和通气孔。

### 3 边坡开挖支护过程数值模型的建立

#### 3.1 基本假设

为了方便建立模型、尽可能的接近实际以及数值模拟计算，故在建立模型时作出下列假定：(1) 对

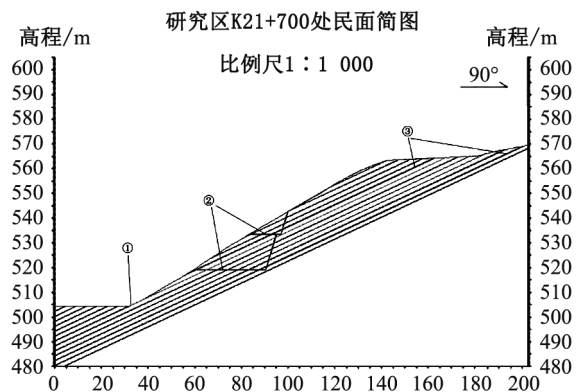


图 1 研究区 K21+700 处边坡断面简图  
Fig.1 Slope section of the study area K21+700

于只在低洼、缓坡等处出现的少量残坡积物,在建立模型时可以忽略;(2)材料服从摩尔-库伦强度准则;(3)忽略在开挖施工过程中,由于开挖卸荷、松弛、应力释放、震动等对岩土体物理力学参数的影响。

### 3.2 地质模型的建立

以研究区典型断面 K21+700 处的实际断面建立三维数值模型,模型长 200 m,宽 6 m,高 94 m,根据实际地层,由地表开始向下依次为硅质岩与层面交替,共设置 12 层,每层岩层厚 2 m,层面使用软弱夹层,厚度为 0.1 m。在坡体中前部,开挖路堑边坡。支护情况按上节所述实际设计方案进行模拟,计算模型除临空面外,四周边界、底边界均设置为单向约束边界。模型如图 2 所示,支护结构如图 3 所示。

模拟工况根据实际施工情况进行确定,共分两级开挖,每级开挖高度为 15 m,模拟工况为天然状态、第一级开挖、第一级支护、第二级开挖以及第二级支护五种工况进行。

### 3.3 模型参数的选取

由室内试验结果并结合经验参数及相关文献<sup>[13]</sup>得到岩石的参数,层面参数主要根据试验数据、公

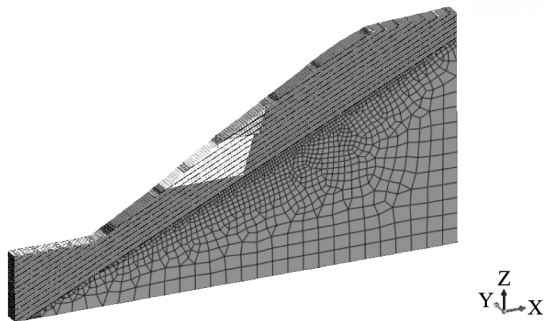


图 2 研究段边坡数值模型

Fig.2 Numerical model of the slope in the study section

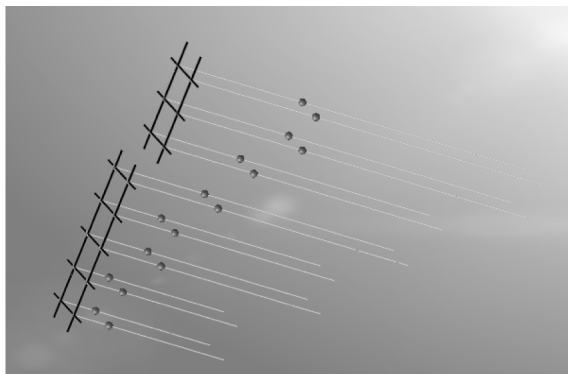


图 3 研究段边坡支护结构模型

Fig.3 Slope support structure model for the study section

式计算及经验参数综合确定,如表 2 所示,锚索设置参数如表 3 所示。

## 4 模拟结果分析

### 4.1 稳定性分析

通过对不同工况下研究段 K21+700 处边坡稳定性的模拟分析,使用强度折减法对边坡稳定性和应变情况进行分析,得出各工况边坡稳定系数见表 4:

开挖第一级台阶后,边坡稳定系数增大至 1.212 5,这是由于第一级开挖深度较小,且减轻了坡体的部分自重,新形成的坡体整体稳定性少许增加。

### 4.2 边坡位移分析

边坡位移变化如表 5 所示,从中可以看出,各

表 2 物理力学计算参数  
Tab.2 Physics and mechanics parameters

| 类型  | 弹性模量 /GPa | 泊松比  | 容重 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 粘聚力 /MPa | 摩擦角 /° |
|-----|-----------|------|---------------------------------------|----------|--------|
| 岩石  | 27        | 0.1  | 26                                    | 12.8     | 55.4   |
| 层面  | 0.26      | 0.45 | 18.6                                  | 0.06     | 27     |
| 框架梁 | 29        | 0.2  | 25                                    |          |        |

表 3 锚索设置参数  
Tab.3 Anchor setting parameters

| 锚索倾角 /° | 锚索间距 /m | 锚索长度 /m | 锚索直径 /mm | 钢筋弹模 /GPa |
|---------|---------|---------|----------|-----------|
| 20      | 3       | 15-35   | 130      | 210       |

表 4 各工况边坡稳定系数  
Tab.5 Slope stability factors for various conditions

| 工况          | 稳定系数    |
|-------------|---------|
| 工况一 天然状态    | 1.206 3 |
| 工况二 开挖第一级台阶 | 1.212 5 |
| 工况三 第一级支护   | 1.650 0 |
| 工况四 开挖第二级台阶 | 1.117 2 |
| 工况五 第二级支护   | 1.912 9 |

表 5 各工况边坡位移变化表  
Tab.5 Slope displacements for various working conditions

| 工况      | 水平向最大位移 /mm | 垂直向最大位移 /mm |
|---------|-------------|-------------|
| 开挖第一级台阶 | 1.30        | 3.68        |
| 第一级支护   | 1.26        | 3.65        |
| 开挖第二级台阶 | 3.23        | 6.99        |
| 第二级支护   | 3.21        | 6.98        |

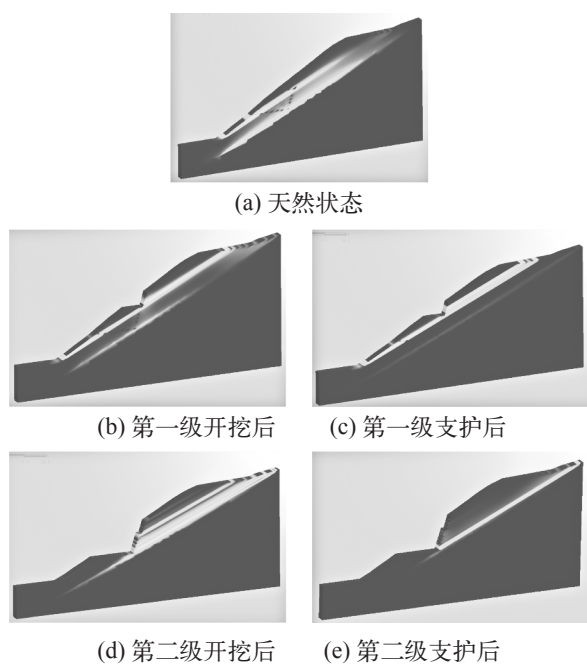


图 4 各施工阶段边坡剪应变图  
Fig.4 Shear strain map of every construction stages

阶段的位移值都不大，随着开挖的进行位移不断增大，经过支护后，由于锚索框架梁的加固，边坡水平垂直位移均有所减少，说明锚索框架梁对边坡位移有一定控制作用<sup>[21]</sup>。

### 4.3 剪应变分析

根据剪应变云图(图4)可以看出，边坡的变形区域主要存在于各软弱夹层处，边坡最上部的剪应变带由坡脚处沿层面向上延伸，未贯通，有沿上部层面从坡脚处剪出、发生滑移—拉裂破坏的趋势，最大剪应变位于坡脚层面处。

第一级开挖后，揭露了部分层面，使其在开挖坡面处临空，最大剪应变位于开挖面底部层面临空处，剪应变带沿层面底部向坡顶延伸，边坡潜在的破坏模式为沿层面向临空面滑动的顺层滑移破坏。

第一级开挖面进行锚索支护后，剪应变区主要分布于开挖揭露的各个层面处，开挖面到坡顶贯通，边坡的潜在破坏形式为开挖揭露岩体沿层面发生顺层滑移破坏。

第二级开挖后，坡体最大剪应变集中在第二级开挖面的坡脚处，剪应变区由开挖面沿层面向上延伸至坡顶处。此时稳定性较低，临空面较大，若遇上暴雨、爆破等扰动因素易沿开挖面下部软弱层面发生顺层滑移失稳破坏。

第二级开挖面进行锚索支护后，由于锚索加作

用，剪应变区范围相比于未支护时的有所减少，剪应变值也有所降低，剪应变区主要分布于坡脚开挖面至坡顶的层面处，仅在第二级开挖面的剪出口处较小区域应变值较大。预应力锚索框架的加固作用提高了坡体的抗剪强度，坡体整体稳定性得到明显改善。根据剪应变图可以看出软弱层面依然为边坡开挖后的潜在滑移面，边坡潜在的破坏模式为沿软弱层面的顺层滑移破坏。

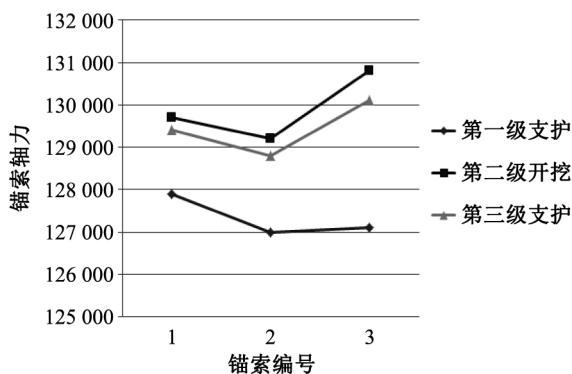


图 5 开挖支护过程中一级开挖面锚索轴力图  
Fig.5 Anchor cable axial force diagram during excavation and support

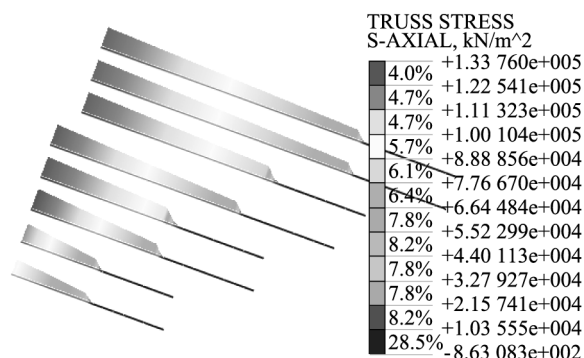


图 6 第二级支护后锚索应力云图  
Fig.6 Anchor cable stress cloud diagram after second stage support

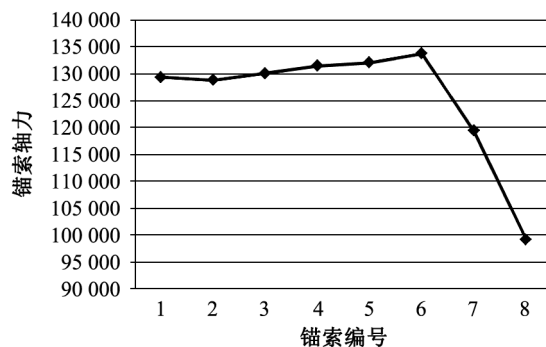


图 7 第二级支护后锚索轴力图  
Fig.7 Axle force diagram of anchor cable after second stage support

#### 4.4 应力分析

使用静力分析法对边坡应力进行分析,天然状态下边坡应力分布,最大主应力随深度的增加而增大,在坡体顶部及坡脚结构面出露处出现拉应力区,由于岩体及层面的抗拉强度较小,所以在此处易形成受拉破坏区,并沿软弱层面形成贯通的剪应变区,对边坡破坏造成隐患。

第一级开挖后,最大主应力在坡顶软弱结构面处拉应力增大,同时沿着开挖揭露的最底层结构面产生分异,从而导致此结构面上下应力分布不均。

第一级开挖面进行锚索支护后,结构面处的最大主应力分异情况也逐渐弱化,在锚索加固的开挖面处大主应力出现了较大的压应力区。

第二级开挖后,最大主应力的分布总体上遵循由下到上逐渐减小的规律,在开挖揭露的最下部软弱层面处最大主应力分布不均,局部有由负值转变为正值的趋势,即由压应力转化为拉应力,在坡顶部后缘处最大主应力为正值,边坡有沿此层面发生滑移破坏的可能。

第二级开挖面进行支护后,开挖面处经过支护后出现较大的压应力,且与未支护时相比,软弱层面处的不均匀应力分布也逐渐趋于正常。但在开挖面揭露最深的软弱层面处依然存在不连续、未贯通的拉应力区,表明边坡仍有沿此层面发生顺层滑移破坏的趋势。

#### 4.5 锚索应力分析

使用静力分析法对边坡应力进行分析(图5-图7)。

由图5可以看出,锚索的轴向拉应力随着第二级开挖逐而逐渐增大,这是因为开挖打破边坡原有的平衡,从而导致应力重分布,同时产生相应的侧向变形,锚索阻止了边坡的变形,导致锚索所受应力增大。在进行第二级支护后,由于第二级锚索的作用,使得第一级锚索轴向应力明显减小。

从图6可以看出,锚索应力不是均匀分布在锚固段上;而是大部分分布于锚固段端部,并沿着锚索轴向逐渐减小,在锚固段远端趋于0。

从图7可以看出,边坡不同部位的破坏机制不同,锚索的受力状态也不同,因此锚索发挥的作用也有所不同,锚索的布置应根据滑动面位置和形状来确定,这样才能使预应力锚索充分发挥其加固作用。

## 5 结论

1) 锚索框架的加固对边坡稳定性具有明显改善,边坡在第一级开挖和支护后稳定系数分别为1.212 5和1.65,第二级开挖和支护后稳定系数分别为1.117 2和1.912 9。

2) 顺层岩质边坡开挖扰动开挖破坏了边坡原有的应力分布,导致岩体产生裂隙损伤和变形,并逐渐扩张,弱化岩体和层面自身的强度。同时,边坡开挖,直接破坏了边坡原有的连续受力体系,由于软弱层面的抗剪强度较低,从而导致岩层沿开挖揭露的软弱层面整体下滑。

#### 参考文献:

- [1] 广西高速公路管理局网 [DB/OL]. <http://www.gxewa.com>.
- [2] 郑颖人, 陈祖煜. 边坡与滑坡工程治理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [3] 郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 91-99.
- [4] 郑颖人, 赵尚毅. 用有限元强度折减法求滑(边)坡支挡结构的内力 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3552-3558.
- [5] 谷德振, 黄鼎成. 岩体结构的分类及其质量系数的确定 [J]. 水文地质工程地质, 1979, 5(2): 69-78.
- [6] 李树森, 任光明, 左三胜. 层状结构岩体顺层斜坡失稳机理的力学分析 [J]. 地质灾害与环境保护, 1995, 6(2): 24-29.
- [7] 冯君, 周德培, 李安洪. 顺层岩质边坡开挖稳定性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 42(9): 1474-1478.
- [8] 陈从新. 复杂条件下地下采矿稳定性研究 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2004.
- [9] 陈从新, 黄平路, 卢增木. 岩层倾角影响顺层岩石边坡稳定性的模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2007, 8(3): 476-481, 486.
- [10] 孙红月, 尚岳全. 顺斜向坡变形破坏特征研究 [J]. 工程地质学报, 1999, 7(2): 142-146.
- [11] 黄润秋. 汤屯高速公路顺层岩质边坡变形机制分析及治理对策研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 240-246.
- [12] 龚文惠, 王平. 顺层岩体路堑边坡稳定性的弹塑性有限元模拟分析 [J]. 岩土力学, 2006, 7(1): 1114-1118.
- [13] 罗继勇. 百色水利枢纽主要工程地质问题及施工处理 [J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 563-568.

(责任编辑 李新)