

文章编号: 1000-7598 (2010) 09-2894-07

# 预应力锚杆框架梁的支护力学行为研究

韩爱民<sup>1</sup>, 李建国<sup>2</sup>, 肖军华<sup>1</sup>, 徐洪钟<sup>1</sup>

(1. 南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009; 2. 中国建材工业地质勘查中心广东总队, 广州 510403)

**摘要:** 采用实际工程数值模拟, 结合现场试验与测试以及变换设计参数进行数值仿真试验等, 对预应力锚杆框架梁支护体系加固边坡的力学响应、支护体系与加固坡体之间相互作用的空间力学效应以及支护体系的力学响应对设计参数的敏感性等问题进行了研究。结果表明, 预应力锚杆框架梁的支护力学性状表现出张拉和稳定工作两个不同阶段, 设计时应主要考虑位于坡脚附近的框架梁与锚杆的内力在稳定工作阶段有所上升的不利影响, 锚杆的锚固预应力、锚固角和锚固间距均对支护体系的内力和加固边坡的压缩变形有显著影响。

**关键词:** 预应力锚杆; 框架梁; 现场监测; 数值仿真; 力学行为

中图分类号: TU 476

文献标识码: A

## Mechanical behaviors of frame beam supporting structure with prestressed anchors

HAN Ai-min<sup>1</sup>, LI Jian-guo<sup>2</sup>, XIAO Jun-hua<sup>1</sup>, XU Hong-zhong<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2. Guangdong Branch, China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Guangzhou 510403, China)

**Abstract:** Based on numerical simulation in combination with field tests and measurements for strengthening works of a slope, as well as numerical experiments by varying the design parameters, mechanical behaviors and sensitivity analysis of frame beam supporting structure with prestressed anchors were studied; moreover, the interaction between the supporting structure system and slope was also discussed. The results show that there are two different stages when this supporting structure system strengthening slope; and they are respectively tension stage and stability stage. One should pay attention to the adverse effects in design that the inner forces of the frame beam and the anchor near slope toe increase during stability stage in work. Furthermore, results of parameter sensitivity analysis show that the prestress, angle, and spacing of the anchor have significant impacts on the inner forces of the supporting structure system and the compression deformation of the reinforced slope.

**Key words:** prestressed anchor; frame beam; field monitoring; numerical simulation; mechanical behaviors

## 1 引言

预应力锚杆框架梁是一种考虑了预应力锚杆与加固边坡相互作用的边坡防护结构型式。它通过钢筋混凝土框架, 将锚杆巨大的锚固力传递给坡体, 改变坡体应力状态, 调用坡体自稳能力, 由此形成了一种兼顾深层抗滑与浅层护坡的复合支护体系, 是一种主动加固方法。由于该支护体系具有加固效果好、结构轻、施工便捷、环保等优点, 因此在边坡防护工程中得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。

预应力锚杆框架梁作为一种近些年出现的支护结构型式, 目前仍缺乏相应设计技术规范, 说明这

种支护体系的受力机制仍有待完善。目前, 有研究者将预应力锚杆框架梁拆分为预应力锚杆和框架梁单独进行分析, 这种方法破坏了预应力锚杆框架梁与边坡相互作用的空间完整性, 难以有效地评价其加固效果<sup>[4-8]</sup>。为此, 本文采用数值模拟, 结合现场试验与实测结果和变换设计参数进行数值仿真试验等, 对预应力锚杆框架梁加固边坡的力学行为进行了深入研究, 得到了一些有意义的结论。

## 2 实际工程数值模拟与实测研究

为研究预应力锚杆框架梁加固边坡的力学性状, 结合南京狮子山滑坡治理之预应力锚杆框架梁

收稿日期: 2009-05-11

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (No. BK2006565)。

第一作者简介: 韩爱民, 男, 1963年生, 教授, 从事中国区域性土的工程特性及深基坑与边坡工程方面的教学和科研。E-mail: h.am@163.com

加固工程，借助有限差分程序  $FLAC^{3D}$ ，对该支护工程中锚杆和框架梁的工作性状进行了模拟，并与实测数据进行了对比。

2.1 工程介绍

南京狮子山地处南京市区北部，海拔 78 m，是国家 AAAA 级风景名胜区，闻名海内外的阅江楼位于狮子山顶。狮子山的坡体主要为土质坡体，仅在坡脚有少许基岩出露，山坡坡度相对较陡，一般在  $40^{\circ}$  左右，局部区域可达  $60^{\circ}$  以上。该地区雨量充沛，气候湿润，年相对温差较大，雨季降水集中，在重力、降水及人类活动影响下多个区域已经或者将要发生滑坡。为了保护风景区内的文化遗产，对该滑坡采用预应力锚杆框架梁进行加固，其中锚固预应力设计值为 500 kN，锚杆长 17.0 m；水平横梁截面尺寸为  $450\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ ，纵向肋梁尺寸为  $150\text{ mm}\times 200\text{ mm}\sim 200\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ 。图 1 为狮子山北坡 II 区预锚框架支护体系加固边坡的剖面图。

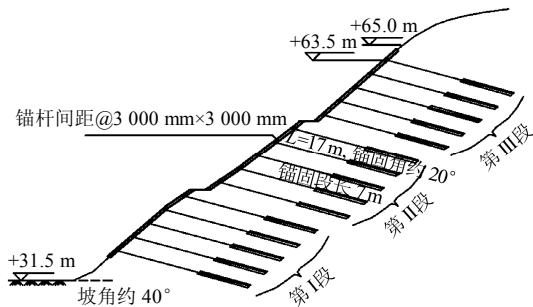


图 1 南京狮子山北坡 II 区加固剖面图  
Fig.1 Section plane of north slope II

2.2 数值模型及计算参数

数值计算模型将边坡土体自上而下分为 3 层，分别为填土、粉质黏土和碎石土，其中粉质黏土包含 2 个亚层。

建立数值计算模型时，边坡岩土采用三维实体单元离散，并符合 Mohr-Coulomb 破坏准则。锚杆与框架梁分别采用  $FLAC^{3D}$  程序中的锚单元（CableSEL）和梁单元（BeamSEL）进行模拟，力学行为采用线弹性准则<sup>[9]</sup>。

此外，数值模型的建立和仿真分析还应符合实际的施工工序。由于预应力锚杆框架梁的施工顺序通常是先施工锚杆，再进行框架梁的浇注或者安装，其工艺是待锚杆和框架梁均具有一定的强度时才开始进行预应力张拉，达到预定值后将锚头锁定在框架梁上。为准确模拟这一施工过程，建立数值模型时，首先把锚杆张拉到一定的预应力，然后将

锚头与框架梁连接并设为刚性连接，使其不会发生相对错动，从而使锚杆的深层加固和框架梁的浅层护坡作用均得以体现。

数值计算模型的土层条件及力学参数均来自工程勘察报告<sup>[10]</sup>，边坡岩土材料参数见表 1。模型中锚杆与框架梁的力学参数分别通过工程现场试验或理论计算获得。给定的数值计算参数分别见表 2 和表 3。本文采用的锚杆为钢筋。

表 1 边坡岩土材料计算参数  
Table 1 Calculation parameters of slope soil

| 序号  | 名称   | 密度<br>$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 体积模量<br>$K/\text{MPa}$ | 剪切模量<br>$G/\text{MPa}$ | 黏聚力<br>$c/\text{kPa}$ | 内摩擦角<br>$\varphi/(^{\circ})$ | 剪胀角<br>$d/(^{\circ})$ |
|-----|------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|
| ①   | 填土   | 1 760                               | 26.1                   | 12.5                   | 15.0                  | 18.5                         | 0                     |
| ②-1 | 粉质黏土 | 1 800                               | 29.2                   | 13.8                   | 30.0                  | 22.0                         | 0                     |
| ②-2 | 粉质黏土 | 1 730                               | 28.9                   | 12.9                   | 38.0                  | 21.0                         | 0                     |
| ③   | 碎石土  | 2 020                               | 31.6                   | 15.9                   | 8.1                   | 28.9                         | 0                     |

表 2 锚单元计算参数  
Table 2 Parameters of CableSEL

| 名称                                                | 量值                |
|---------------------------------------------------|-------------------|
| 锚杆（钢筋）杨氏模量/GPa                                    | 45.0              |
| 剪切连接弹簧粘聚强度/MPa                                    | 2.26              |
| 剪切连接弹簧摩擦角/ $(^{\circ})$                           | 25.0              |
| 剪切连接弹簧刚度/ $(\text{N}/\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$ | $1.76\times 10^8$ |
| 注浆孔周长/m                                           | 0.471             |
| 锚杆（钢筋）拉伸强度/kN                                     | 1 200             |

表 3 梁单元计算参数  
Table 3 Parameters of BeamSEL

| 名称                     | 横(纵)梁计算参数                                    |
|------------------------|----------------------------------------------|
| 杨氏模量/GPa               | 28.0                                         |
| 泊松比                    | 0.2                                          |
| 横截面积/ $\text{m}^2$     | 0.225 (0.037 5)                              |
| 极惯性矩/ $\text{m}^4$     | $8.3\times 10^{-3}$ ( $2.65\times 10^{-4}$ ) |
| 绕 y 轴惯性矩/ $\text{m}^4$ | $4.6\times 10^{-3}$ ( $1.95\times 10^{-4}$ ) |
| 绕 z 轴惯性矩/ $\text{m}^4$ | $3.7\times 10^{-3}$ ( $0.7\times 10^{-4}$ )  |

2.3 计算与实测结果分析

本工程锚杆张拉施工结束后，随即对支护结构体系的内力变化进行历时半年多的跟踪监测。数据显示，监测期间框架梁的弯矩不断变化，特别是在雨量充沛的 5—7 月份，但这之后各区段框架梁的弯矩变化就不太明显了。图 2（a）为位于坡体下部（坡脚）、中部、上部（坡顶）的第 I、II、III 段横梁（各自记作 P1-C、P2-C、P3-C）在锚杆张拉刚结束时的弯矩监测值。图 2（b）则为最后一次监测

得到的各梁弯矩图,此时支护体系已处于稳定工作状态。

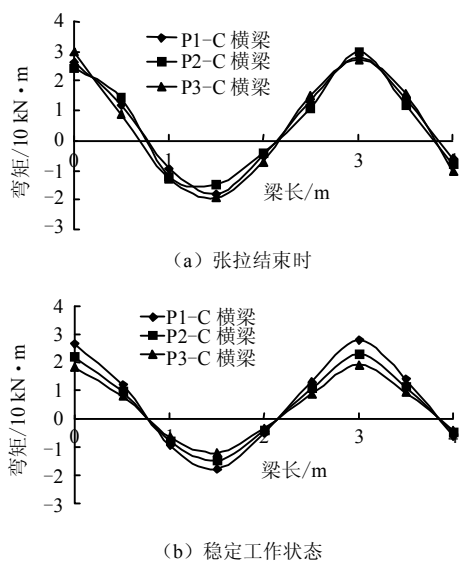


图2 框架梁弯矩监测值

Fig.2 Bending moments of transverse beam

从图2可以看出,锚杆刚刚张拉完成时坡脚、坡中和坡顶处框架梁的弯矩值几乎相等,而稳定工作状态时各段框架梁的弯矩值相差较大,以坡脚处最大,坡顶处最小,二者相差30%左右。对比图2(a)和图2(b)发现,坡脚附近的框架梁在稳定工作状态时的弯矩值较刚刚张拉完成时有所增加,而坡顶附近的框架梁在稳定工作状态时的弯矩值较刚刚张拉完成时有所减小。

数值计算结果反映了上述规律。图3分别为坡脚和坡顶的P1-C、P3-C横梁的弯矩计算值与梁在张拉阶段的弯矩实测值的对比,说明预应力锚杆框架梁在张拉阶段与在内力调整平衡后的稳定工作阶段的力学行为是不同的,计算所得具体规律与实测相吻合。

究其原因,锚杆张拉刚结束,框架梁承受的坡体反力主要来源于梁施压于土体产生的被动土压力,该压力大小受锚固预应力影响,具有同样锚固力大小的框架梁的弯矩会相等。而稳定工作时,框架梁承受的坡体反力主要来源于边坡土体因变形而作用于框架梁的主动土压力,且位置不同土压力不等。因此受力状态的不同导致支护体系在不同工作阶段的内力大小不一致。

对锚杆轴力的计算与实测结果分析得到基本相同的结论:张拉阶段,相同锚固预应力下锚杆的轴力并不存在差别,如图4(a)所示。但随着工作阶段坡体的应力状态不断调整,达到最终平衡时,坡体

上不同位置锚杆的轴力产生了变化。坡顶附近锚杆的轴力在稳定工作阶段较张拉结束时减小,而坡脚附近锚杆的轴力增加,如图4(b)所示。这提醒设计时需要考虑坡体完成应力调整后坡脚锚杆实际承受的最大轴力是否超过设计值。图4(b)为锚杆轴力计算值与最后一次锚杆轴力监测值的比较,发现二者吻合较好。

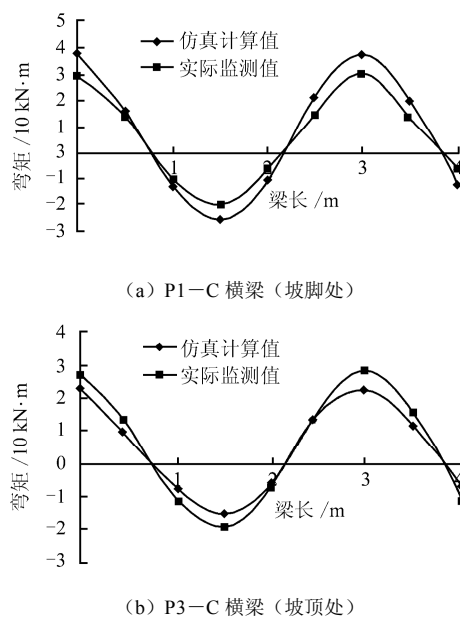


图3 弯矩对比

Fig.3 Comparison of moment

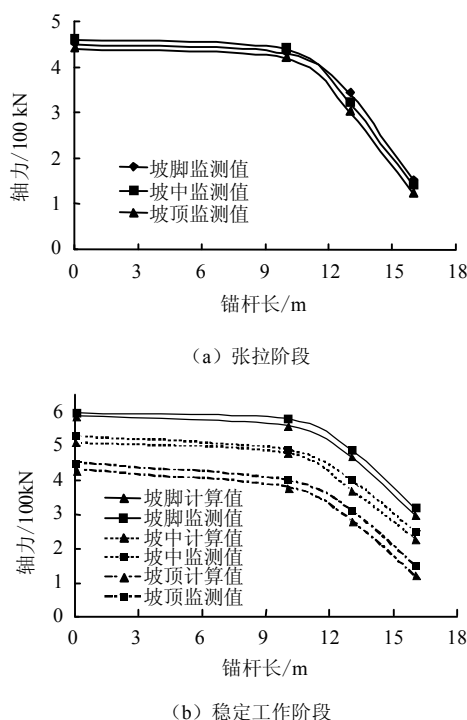


图4 锚杆轴力的计算及实测值

Fig.4 Calculated and measured axial forces of anchor

3 支护结构设计参数的影响研究

预应力锚杆框架梁支护体系的设计理论仍欠完善，支护结构的参数多根据经验确定，因此有必要研究支护体系的工作性状与结构设计参数之间的关系。本节通过  $FLAC^{3D}$  进行数值仿真，探讨锚固预应力、锚固角、锚固间距等主要设计参数对加固边坡的坡体位移和框架梁的内力的影响规律。

3.1 数值模型及计算参数

进行参数影响或敏感性研究时，为使结论更具有普遍意义，应避免由数值模型的差异对分析结论产生的影响。本文以矩形型式布置的预应力锚杆框架梁和最一般的边坡结构型式为例进行数值仿真试验，如图 5 所示。

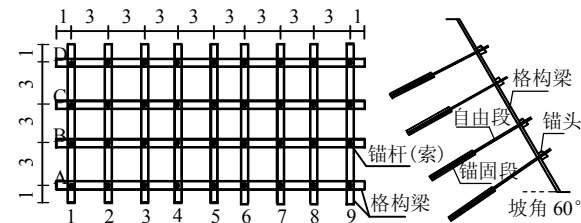


图 5 预应力锚杆框架梁简图 (单位: m)  
Fig.5 Sketch of frame beams and pre-stressed anchors (unit: m)

根据图 5 中的几何模型建立数值计算模型：设坡体由均质土层构成，坡高 12.0 m，坡角为 60°。为消除边界效应影响，边坡向前延伸 26.0 m，向后延伸 42.0 m，向下延伸 26.0 m，坡体宽 28.0 m。纵、横向框架梁截面均为 300 mm×350 mm。锚杆的基本参数为：纵横向间距均为 3.0 m，长 16.0 m，锚固段长 8.0 m，锚孔直径为 150 mm，锚固角为 30°；锚固预应力设计值为 600 kN。

边坡、锚杆和框架梁的单元类型和力学模型同第 2 章节。土体的计算参数见表 4，梁单元的计算参数见表 5。锚单元的计算参数与表 2 相同。

表 4 Mohr-Coulomb 模型计算参数  
Table 4 Parameters of Mohr-Coulomb model

| 名称                               | 数值    |
|----------------------------------|-------|
| 密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 1 900 |
| 体积模量 $K/\text{MPa}$              | 29.3  |
| 剪切模量 $G/\text{MPa}$              | 13.5  |
| 凝聚力 $c/\text{kPa}$               | 19.0  |
| 内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$          | 23    |
| 剪胀角 $d/(^\circ)$                 | 0     |

表 5 梁单元计算参数

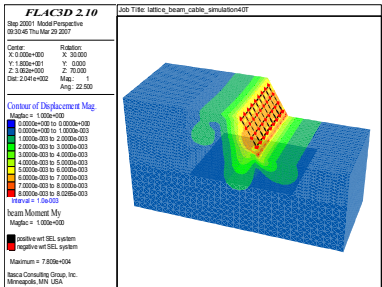
Table 5 Parameters of Beam SEL

| 名称                     | 数值                   |
|------------------------|----------------------|
| 杨氏模量/GPa               | 28                   |
| 泊松比                    | 0.2                  |
| 横截面积/ $\text{m}^2$     | 0.105                |
| 极惯性矩/ $\text{m}^4$     | $2.5 \times 10^{-3}$ |
| 绕 y 轴惯性矩/ $\text{m}^4$ | $1.6 \times 10^{-3}$ |
| 绕 z 轴惯性矩/ $\text{m}^4$ | $0.9 \times 10^{-3}$ |

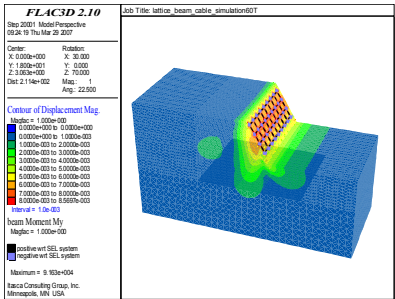
3.2 计算结果分析

3.2.1 锚固预应力的影响

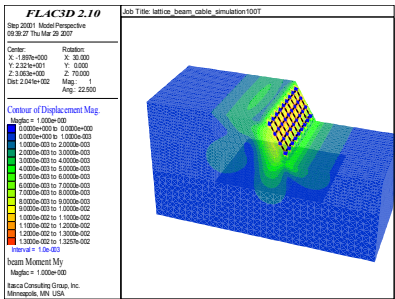
图 6 为不同锚固预应力下坡体位移场的等值线云图。



(a) 锚固预应力为 400 kN



(b) 锚固预应力为 600 kN



(c) 锚固预应力为 1 000 kN

图 6 不同锚固预应力下边坡位移等值线云图 (单位: m)  
Fig.6 Displacement nephogram of slope under different prestresses (unit: m)

从图 6 可以看出，当锚固预应力从 400 kN 增加至 1 000 kN 时，坡体的位移场发生显著的变化，

即坡体向下滑动趋势逐渐减小,而坡面压缩变形量随着锚固预应力增加迅速增大,如图7所示,且锚固预应力越大,增加速率越大,但锚固预应力更大时坡面可能会出现塑性压缩破坏。

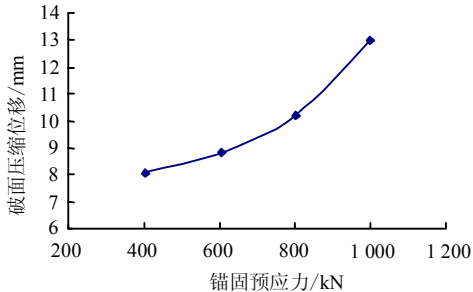


图7 锚固预应力与坡面压缩位移关系曲线

Fig.7 Displacements of slope surface vs. prestress of cable

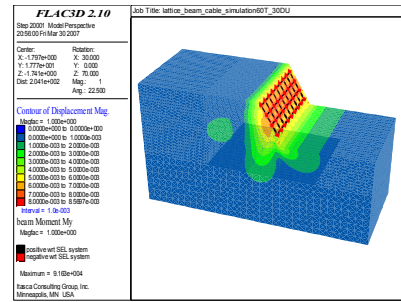
关于锚固预应力对框架梁内力的影响情况,数值计算表明,横、纵向框架梁的弯矩和剪力均随锚固预应力增加而增大,且其最大值均在锚头处。以坡脚处A号横梁为例,锚固预应力为600、800、1000 kN和最大弯矩比锚固应力为400 kN时分别增加约17%、18%和25%,最大剪力分别增加约17%、21%、29%。同时,框架梁在坡面上位置不同,内力差异也较大,如同为横向的A、D号梁,由于分别位于边坡的坡脚和坡顶处,在锚固预应力为800 kN时,A梁的最大弯矩和剪力均比D梁大约30%,而同为纵向的1、5号梁,由于分别位于边坡的端部和中部,1号梁的最大弯矩和剪力分别比5号梁大约30%。这均是由于边坡加固后坡体应力状态经重新调整导致应力分布不均所致。

### 3.2.2 锚固角的影响

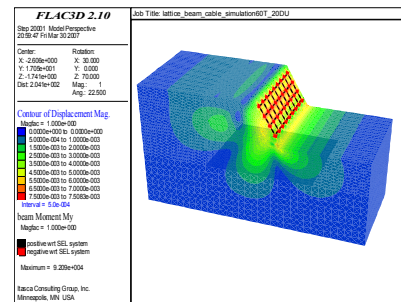
图8为锚杆的锚固角分别为30°、20°和10°时坡体位移场的等值线云图。从图8中可以看出,锚固角从30°变化到10°时,坡体的位移场发生显著变化,即随着锚固角减小,坡体内部更大范围内的土体被调动起来,使得坡体由外向内的变形过渡更加平缓,但坡面压缩变形随着锚固角的减小也随之减小,如图9所示,这表明选取合适的锚固角可以改善支护体系主动加固边坡的效果。本算例中锚固角为30°时锚杆垂直于坡面,其加固效果明显好于其他情况(指锚杆布置更趋近于水平的情况)。

对于锚固角对框架梁内力的影响情况,数值计算表明横、纵向框架梁的弯矩和剪力均随锚固角增加而增大。当锚固角为20°和30°时,A号横梁的弯矩比10°时分别增加约16%和40%,剪力分别增加约17%和21%;5号纵梁的弯矩分别增加约14%和

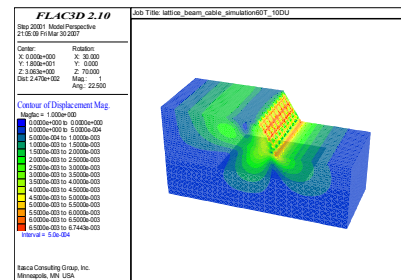
20%,剪力分别增加约20%和25%。



(a) 锚固角为30°



(b) 锚固角为20°



(c) 锚固角为10°

图8 不同锚固角下边坡位移等值线云图(单位:m)

Fig.8 Displacement nephogram of slope under different anchoring angles (unit: m)

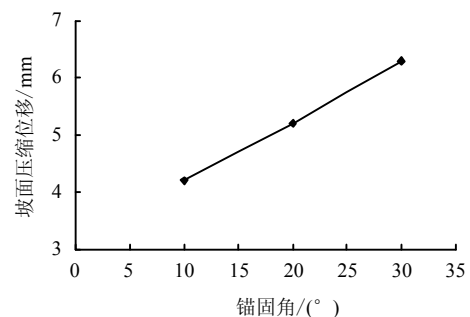
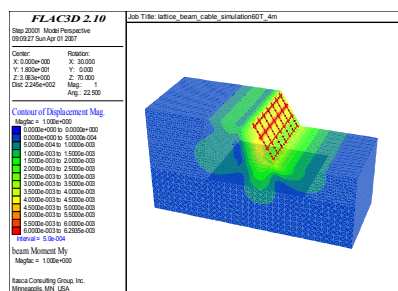


图9 锚固角与坡面变形关系曲线

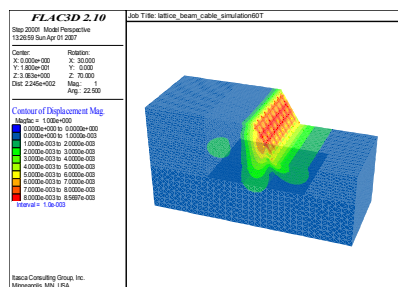
Fig.9 Displacements of slope surface vs. anchoring angle

### 3.2.3 锚固间距的影响

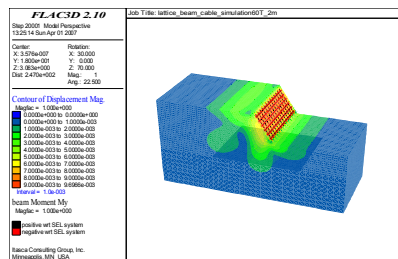
图10为锚杆的锚固间距分别为4.0、3.0 m和2.0 m时坡体位移场的等值线云图。



(a) 锚固间距为 4.0 m



(b) 锚固间距为 3.0 m



(c) 锚固间距为 2.0 m

图 10 不同锚固间距下边坡位移等值线云图 (单位: m)

Fig.10 Displacement nephogram of slope under different anchoring intervals (unit: m)

从图 10 可以看出, 锚固间距从 4.0 m 减小到 2.0 m 时, 坡体向下滑动趋势逐渐减小, 被压缩区域增加, 且随着锚杆间距减小, 坡面的压缩变形增加, 如图 11 所示, 变化速率随锚固间距的减小逐渐降低。

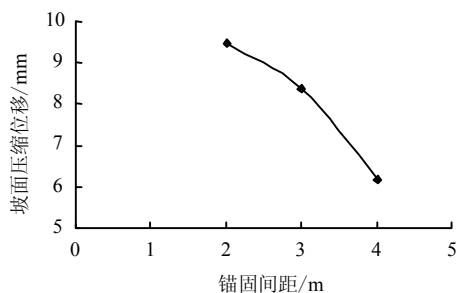


图 11 坡面压缩变形与锚固间距关系曲线

Fig.11 Displacement of slope surface vs. anchoring distance

关于锚固间距对框架梁内力的影响情况, 数值计算表明横、纵向框架梁的弯矩和剪力均随锚固间

距增加而增大。当锚固间距为 3.0、4.0 m 时, A 号横梁的最大弯矩比间距为 2.0 m 时分别增加约 10% 和 50%, 最大剪力分别增加约 11% 和 70%。间距越大, 增加速率越快。

## 4 结 论

(1) 预应力锚杆框架梁的支护力学性状表现出张拉和稳定工作两个不同阶段: 张拉阶段时, 具有同样锚固力大小的框架梁的内力处处相等; 稳定工作阶段时, 位于坡脚附近的框架梁与锚杆的内力较张拉阶段增大, 而位于坡顶附近的框架梁与锚杆的内力较张拉阶段减小。设计时, 需考虑这一变化对位于坡脚的支护结构带来的不利影响。

(2) 锚固预应力增加时, 边坡下滑趋势逐渐减弱, 坡面压缩变形以及横纵向框架梁的内力逐步增大, 变化速率越来越快。

(3) 锚固角减小时, 坡体内部更大范围的土体被调动起来, 但坡面压缩变形随之降低, 横纵向框架梁的内力逐渐降低, 速率减缓。锚固角垂直坡面的加固效果好于锚杆布置更趋近于水平的情况。

(4) 锚固间距增加时, 坡体向下滑动趋势增大, 被压缩区域减少, 坡面压缩变形迅速减小, 而横、纵向框架梁的内力迅速增大, 变化速率越来越快。

## 参 考 文 献

- [1] 朱彦鹏, 郑善义, 张鸿. 黄土边坡框架预应力锚杆支挡结构的设计研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1582—1585.  
ZHU Yan-peng, ZHENG Shan-yi, ZHANG Hong. Design of frame supporting structure with pre-stressed anchor bars on loess slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(Supp.): 1582—1585.
- [2] 李建国. 预锚格构体系三维数值仿真及其设计方法研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2007.
- [3] 吴礼舟, 黄润秋. 锚杆框架梁加固膨胀土边坡的数值模拟及优化[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 605—608.  
WU Li-zhou, HUANG Run-qiu. Numerical simulation and optimum design of anchor frame beam strengthening expansive soil roadcut slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(4): 605—608.
- [4] 张华, 陆阳, 程强. 岩质边坡锚杆(索)框架梁加固的数值模拟[J]. 公路交通科技, 2008, 25(1): 21—26.  
ZHANG Hua, LU Yang, CHENG Qiang. Numerical simulation of reinforcement for rock slope with rock bolt

- (anchor cable) frame beam[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2008, 25(1): 21—26.
- [5] 梁瑶, 周德培, 赵刚. 预应力锚索框架支护结构的设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 318—322.  
LIANG Yao, ZHOU De-pei, ZHAO Gang. Design of support of frame beam and prestressed anchor[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(2): 318—322.
- [6] 何思明, 杨雪莲, 周永江. 预应力锚索地梁与地基共同作用分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 83—87.  
HE Si-ming, YANG Xue-lian, ZHOU Yong-jiang. Analysis of interaction of prestressed anchor rope foundation beam and foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 83—87.
- [7] 唐辉明, 许英姿, 程新生. 滑坡治理工程中钢筋混凝土格构梁设计理论研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1683—1687.  
TANG Hui-ming, XU Ying-zi, CHENG Xin-sheng. Research on design theory of lattice frame anchor structure in landslide control engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(11): 1683—1687.
- [8] 肖世国, 周德培. 岩石高边坡预应力锚索地梁的一种内力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 250—253.  
XIAO Shi-guo, ZHOU De-pei. Internal force calculating method of prestressed-cable beam on foundation for high rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 250—253.
- [9] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [10] 江苏省建筑设计研究院. 南京狮子山公园阅江楼工程地质勘察报告[R]. 南京: 江苏省建筑设计研究院, 1998.

#### 上接第 2893 页

- [4] 苏怀智, 吴中如, 戴会超. 初探大坝安全智能融合监控体系[J]. 水力发电学报, 2005, 24(1): 122—126.  
SU Huai-zhi, WU Zhong-ru, DAI Hui-chao. System of theories and methods monitoring intelligently dam safety[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2005, 24(1): 122—126.
- [5] 罗长军, 胡峰, 张磊奇, 等. 陡坡水库大坝渗透稳定性及渗透变形分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1305—1311.  
LUO Chang-jun, HU Feng, ZHANG Lei-qi, et al. Analysis of seepage stability and deformation of dam for Doupo Reservoir[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1305—1311.
- [6] 马福恒, 何文洲. 河南省燕山水库蓄水安全鉴定建筑物安全监测自检报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008.
- [7] LAWRENCE A KLEIN. Sensor and data fusion concepts and applications [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [8] 涂国平, 邓群钊. 多传感器数据的统计融合方法[J]. 传感器技术, 2007, 20(3): 28—32.  
TU Guo-ping, DENG Qun-zhao. A statistical method for the data fusion of multi-sensor[J]. **Journal of Transducer Technology**, 2007, 20(3): 28—32.
- [9] 王威, 周红军, 王润生. 多传感器数据融合的一种方法[J]. 传感器技术, 2008, 22(9): 39—41.  
WANG Wei, ZHOU Hong-jun, WANG Run-sheng. A method of the multi-sensor data fusion[J]. **Journal of Transducer Technology**, 2008, 22(9): 39—41.