

特性作为约束条件，建立最优化数值模型，通过最优化计算的方式得到与该圆弧相交的各点应变之和的最大值,最大值的位置即为潜在滑裂面。

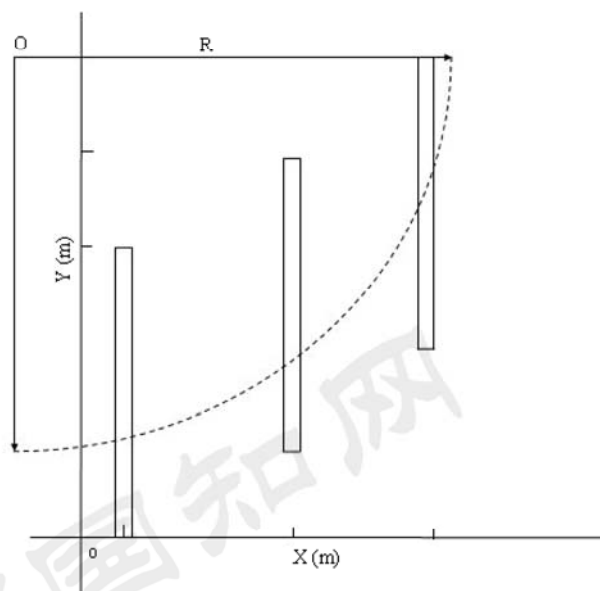


图 3-11 深部测斜仪、潜在滑裂面示意图

Figure3-11 Schematic diagram of inclinometers and Potential slip surface

根据图 3-10，分别对 EI2、EI3、EI41、EI42 边坡建立最优化计算模型：

对于 EI2 边坡根据深部测斜仪长度和相对布设位置建立如图 3-11 所示的直角坐标系，通过求个深部测斜仪所测挠度最大处，画出相应的圆弧形滑裂面。

首先根据各个边坡深部测斜仪的布置图对拟合得到的各深部测斜仪的挠度曲线坐标平移，得到各深部测斜仪在相应边坡坐标系中的挠度方程。

对 EI3 边坡建立最优化模型见公式 3-20：

$$\begin{aligned}
 & \text{Max} \quad x_1 + x_2 + x_3 \\
 & \text{s.t.} \quad \begin{cases} 0 \leq y_1 \leq 10 \\ 10 \leq y_2 \leq 20 \\ 18 \leq y_3 \leq 28 \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - (x_2 - x_0)^2 - (y_2 - y_0)^2 = 0 \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - (x_3 - x_0)^2 - (y_3 - y_0)^2 = 0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{3-20}$$

式中 x_0 ——EI2 边坡潜在滑裂面圆弧圆心的横坐标；

y_0 ——EI2 边坡潜在滑裂面圆弧圆心的纵坐标；

- x_1 ——EI2 边坡第一级台阶上 y_1 坐标处深部测斜仪挠度值；
 x_2 ——EI2 边坡第一级台阶上 y_2 坐标处深部测斜仪挠度值；
 x_3 ——EI2 边坡第一级台阶上 y_3 坐标处深部测斜仪挠度值；
 y_1 ——EI2 边坡第一级台阶上的挠度曲线的竖向坐标；
 y_2 ——EI2 边坡第二级台阶上的挠度曲线的竖向坐标；
 y_3 ——EI2 边坡第三级台阶上的挠度曲线的竖向坐标。

将挠度曲线影射到边坡直角坐标系中，其中 EI2 边坡一级台阶深部测斜仪的挠度曲线为：

$$x_1 = -0.0011y^4 + 0.0108y^3 - 0.0447y^2 + 0.0756y - 0.0411$$

EI2 边坡二级台阶深部测斜仪的挠度曲线为：

$$x_2 = -0.0001(y-10)^4 - 0.0031(y-10)^3 - 0.0218(y-10)^2 - 0.0368(y-10) + 0.0158 - 13.3333$$

EI2 边坡三级台阶深部测斜仪的挠度曲线为：

$$x_3 = 0.0001(y-18)^5 - 0.0021(y-18)^4 + 0.0192(y-18)^3 - 0.0731(y-18)^2 + 0.1152(y-18) - 0.1152 - 26.6667$$

对 EI3 边坡建立最优化模型见公式 3-21：

$$\text{Max} \quad x_1 + x_2 + x_3 \quad (3-21)$$

$$s.t. \begin{cases} 0 \leq y_1 \leq 10 \\ 10 \leq y_2 \leq 20 \\ 18 \leq y_3 \leq 28 \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - (x_2 - x_0)^2 - (y_2 - y_0)^2 = 0 \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - (x_3 - x_0)^2 - (y_3 - y_0)^2 = 0 \end{cases}$$

- 式中 x_0 ——EI3 边坡潜在滑裂面圆弧圆心的横坐标；
 y_0 ——EI3 边坡潜在滑裂面圆弧圆心的纵坐标；
 x_1 ——EI3 边坡第一级台阶上 y_1 坐标处深部测斜仪挠度值；
 x_2 ——EI3 边坡第二级台阶上 y_2 坐标处深部测斜仪挠度值；
 x_3 ——EI3 边坡第三级台阶上 y_3 坐标处深部测斜仪挠度值；
 y_1 ——EI3 边坡第一级台阶上的挠度曲线的竖向坐标；
 y_2 ——EI3 边坡第二级台阶上的挠度曲线的竖向坐标；
 y_3 ——EI3 边坡第三级台阶上的挠度曲线的竖向坐标。

将挠度曲线影射到边坡直角坐标系中，其中 EI3 边坡一级台阶深部测斜仪的挠度曲线为：

$$x_1 = 0.0001y^4 + 0.0001y^3 + 0.0157y^2 - 0.0216y + 0.0069$$

EI3 边坡二级台阶深部测斜仪的挠度曲线为：

$$x_2 = -0.0000040(y-8)^4 + 0.0000757(y-8)^3 - 0.0001548(y-8)^2 + 0.0002565(y-8) - 0.0001667 - 13.3333$$

EI3 边坡三级台阶深部测斜仪的挠度曲线为：

$$x_3 = -0.0011(y-18)^3 + 0.0134(y-18)^2 - 0.0213(y-18) + 0.0021 - 26.6667$$

对 EI41 边坡建立最优化模型见公式 3-22：

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & x_1 + x_2 + x_3 \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} 0 \leq y_1 \leq 10 \\ 10 \leq y_2 \leq 20 \\ 20 \leq y_3 \leq 30 \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - (x_2 - x_0)^2 - (y_2 - y_0)^2 = 0 \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - (x_3 - x_0)^2 - (y_3 - y_0)^2 = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3-22)$$

式中 x_0 ——EI41 边坡潜在滑裂面圆弧圆心的横坐标；
 y_0 ——EI41 边坡潜在滑裂面圆弧圆心的纵坐标；
 x_1 ——EI41 边坡第一级台阶上 y_1 坐标处深部测斜仪挠度值；
 x_2 ——EI41 边坡第二级台阶上 y_2 坐标处深部测斜仪挠度值；
 x_3 ——EI41 边坡第三级台阶上 y_3 坐标处深部测斜仪挠度值；
 y_1 ——EI41 边坡第一级台阶上的挠度曲线的竖向坐标；
 y_2 ——EI41 边坡第二级台阶上的挠度曲线的竖向坐标；
 y_3 ——EI41 边坡第三级台阶上的挠度曲线的竖向坐标。

将挠度曲线影射到边坡直角坐标系中，其中 EI41 边坡一级台阶深部测斜仪的挠度曲线为：

$$x = -0.0003y^4 + 0.0024y^3 - 0.0076y^2 + 0.0124y - 0.0070$$

EI41 边坡二级台阶深部测斜仪的挠度曲线为：

$$x = 0.0001(y-10)^3 - 0.0024(y-10)^2 + 0.0155(y-10) - 0.0162 - 13.3333$$

EI41 边坡三级台阶深部测斜仪的挠度曲线为：

$$x = -0.0010(y-20)^4 + 0.0113(y-20)^3 - 0.0510(y-20)^2 + 0.0955(y-20) - 0.0560 - 26.6667$$

3.4.2 非线性规划模型的求解

Lingo 是美国 Lindo 系统公司开发的一套专门用于求解最优化问题的软件包。Lingo 可以用于求解非线性规划问题，也可以用于一些线性和非线性方程(组)的求解。Lingo 软件的最大特色在于可以允许优化模型中的决策变量是整数(即整数规划)，而且执行速度很快。

Lingo 是最优化问题的一种建模语言, 包括许多常用的函数可供使用者建立优化模型时调用, 并提供与其他数据文件的接口, 易于方便地输入、求解和分析大规模最优化问题。

由于这些特点, Lingo 系统公司的线性、非线性和整数规划求解程序已经被全世界数千万的公司用来做最大化利润和最小化成本的分析。应用的范围包含生产线规划、运输、财务金融、投资分配、资本预算、混合排程、库存管理、资源配置等。

Lingo 软件作为著名的专业优化软件, 其功能比较强、计算效果比较好, 与那些包含部分优化功能的非专业软件相比, 通常具有明显的优势。此外, Lingo 软件使用起来非常简便, 很容易学会, 在优化软件市场占有很大份额, 在国外运筹学类的教科书中也被广泛用做教学软件^[43]。利用 Lingo 软件编程求得各边坡的滑裂面位置:

EI2在实际边坡坐标系中的位置分别为:

(0.000000, 1.037012), (13.34982, 16.71123), (0.36113, 35.00000)

圆弧滑裂面的圆心坐标为: (0.000000, 19.57828)

EI3在实际边坡坐标系中的位置分别为:

(2.360900, 10.00000), (13.33413, 17.24661), (27.79533, 25.24661)

圆弧滑裂面的圆心坐标为: (0.000000, 19.57828)

EI41在实际边坡坐标系中的位置分别为:

(0.02450000, 3.999999), (13.33526, 18.00000), (26.79953, 25.22824)

圆弧滑裂面的坐标原点为: (1.494113, 9.230711)

3.5 本章小结

本章对锚杆监测光纤布拉格光栅应变和温度数据进行分析, 得到温度补偿后锚杆各测点的应变值, 对锚杆受力分析, 通过各点应变值求得锚杆的拉力值, 进而判断现场施工条件下锚杆监测时间与轴力分布变化情况。

对深部测斜仪的监测数据进行分析计算, 对差分计算方法进行室内试验验证, 得到了较好的结果, 利用差分计算方法求得深部测斜仪各测点的挠度即边坡内部变形。通过数据拟合的方式得到深部测斜仪的挠度曲线, 然后建立最优化数学模型, 利用 Lingo 软件编程计算得到各边坡潜在滑裂面位置。

第4章 边坡稳定性分析

4.1 引言

边坡稳定性分析理论由来已久，边坡稳定性研究是一项难度很大、综合性很强、涉及面广的研究工作，因此，在边坡进行稳定性分析是边坡设计的中心环节，目前边坡稳定性的评价方法普遍采用极限分析法，通过分析土体在破坏那一刻的力的平衡来求解问题^[44]。

加拿大岩土软件 Geo-SLOPE 是边坡稳定分析中极为专业的分析软件，得到岩土工程界广泛的认可^[45]。

4.2 数值分析模型的建立

在土力学中，边坡稳定性分析是和另外两个分支即土压力和地基承载力同时发展起来的。1776 年，法国工程师^[46]提出了计算挡土墙土压力的方法，标志着土力学雏型的产生，朗肯^[47]在 1857 年在假设墙后土体各点处于极限平衡状态的基础上，建立了计算主动和被动土压力的方法。库仑和朗肯在分析土压力时采用的方法后来被推广到地基承载力和边坡稳定分析中，形成了一个体系，这就是极限平衡方法。

极限平衡法^[48]是建立在大家所熟悉的摩尔—库仑强度准则基础上的，其表达式为：

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (4-1)$$

式中 τ_f ——破坏面上的剪应力；

c' ——土的有效粘聚力；

σ' ——破坏面上有效法向应力；

ϕ' ——土的有效摩擦角。

极限平衡方法的基本特点是，只考虑静力平衡条件和土的摩尔—库仑准则。通过分析土体在破坏那一刻的力的平衡来求得问题的解。在大多数情况下，问题是静不定的。极限平衡方法处理这个问题的对策是引入一些假定，使问题变得静定可解。这种处理，方法的严密性受到了损害，但是，对计算

结果的精度损害并不大,由此而带来的计算量大为减少。

从库仑和朗肯两种不同思路出发,极限平衡方法也逐渐形成两个独立的分支。一是通过研究滑裂面上作用的力的静力平衡和确定临界滑裂面求得问题的解,在此基础上导出了目前广泛采用的稳定分析的条分法;另一是在假定土体内处处达到极限平衡状态的前提下,用特征线法求解应力场,在一定的简化条件下,获得问题的闭合解。

4.2.1 极限平衡分析的垂直条分法

首先假定一个扰动因素,使土体从目前的稳定状态进入极限平衡状态。此时,滑体内出现一假想的滑裂面。在该滑裂面上,每一点的法向应力和切向应力都满足摩尔-库仑强度准则。

在边坡稳定问题中,通常的做法是将土体的抗剪强度指标 c' 和 ϕ' 减少为 $\frac{c'}{F}$ 和 $\frac{\tan \phi'}{F}$ 。 F_s 称为安全系数。Sarma(1968)^[49]提出了另一种做法,即在滑动土体每一个单元加上一水平体积力,使土体在假设的滑裂面上达到极限平衡状态。

在滑裂面为一特定的形状时,如直线(Coulomb,1776)^[50]或对数螺旋线(Terzaghi,1944)^[51],则可以通过求解静力平衡方法唯一地确定相应该滑裂面的上述扰动因素的量值。如果滑裂面为任意形状,那么,为了确定沿滑裂面的应力分布,需要将滑动土体分为若干垂直土条,通过分析作用于土条上的力平衡方程。为了使问题变得静定可解,还需要对土条,通过分析作用于土条上的力建立平衡方程。为了使问题变得静定可解,还需要对土条间的作用力作一些假定,最终得使该滑裂面处于极限平衡状态所需要的扰动因素的最值。

4.2.2 数值分析模型的建立

破碎岩石的滑动面多呈圆弧形,露天矿的废石堆和尾矿坝也多呈圆弧形破坏,在强风化或非常破碎的岩体中,边坡的破坏面也为圆弧形。

圆弧形条分法是土坡稳定性分析的一种比较简单实用的方法,此法由瑞典费兰纽斯首创,故称为瑞典法^[52]。这种方法认为边坡岩体的滑动属于平面问题,并假定滑面为圆弧形,其位置和安全系数要通过反复试算确定。计算中不考虑条块间的作用力。由于计算比较简单,所以在边坡稳定性计算中得

到广泛应用。

计算方法如下：

首先在已给出的边坡上，任意作一圆弧面，其半径为 R ，以此圆弧面作为可能的滑裂面，将滑裂面以上的土体分为几个垂直条块。

计算作用在每一条块上的力。将每一条块的自重分解为垂直于滑动面的法向压力 N_i 和平行于滑动面的切向力 T_i ，即

$$N_i = W_i \cos \alpha_i \quad (4-2)$$

$$T_i = W_i \sin \alpha_i \quad (4-3)$$

作用在该条块多对应的长为 L_i ，有摩擦力 $N_i \tan \varphi$ 与总内聚力 CL_i ，此二力是抵抗滑动的抗滑力。

式中 α_i ——通过条块重心得垂直于底边法线的夹角；

φ ——土(岩)体的内摩擦角；

C ——条块滑面上的内聚力。

在条块分界面上还有垂直和平行条块界面的 E_1, E_2, T_1 和 T_2 等作用力，为了简化计算，假定 $T_1 = T_2, E_1 = E_2$ ，故在计算中这些力不予考虑。计算各条块的下滑力对圆弧圆心点的力矩 M_1

$$M_1 = R \sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i \quad (4-4)$$

计算各条块抗滑力对圆心的力矩 M_2

$$M_2 = R \sum_{i=1}^n (CL_i + N_i \tan \varphi) = R \sum_{i=1}^n (CL_i + W_i \cos \alpha_i \tan \varphi) \quad (4-5)$$

计算安全系数

$$F_s = \frac{CL + \sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i \tan \varphi}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (4-6)$$

式中 L ——圆弧的长度。

假设有若干可能滑动面，需重复上述。计算步骤是将每一个可能滑动面的安全系数计算出来。

确定最危险的滑动面。比较计算所得的所有安全系数，其中 n 值最小的滑动面就是最危险的滑动面。如果此最小值小于 1，则说明此边坡不稳定。这里需要说明的是设计边坡的安全系数是大于 1 的某一数值(其大小根据工程重要性而定)，故上述计算所得安全系数的最小值应不小于该值，否则需要

按设计要求调整坡高或坡面角, 再进行重复计算, 直至达到设计要求为止。

根据规范边坡的最小安全系数的要求见表 4-1, 对于地质条件很复杂或坏后果极严重的边坡工程, 其稳定安全系数适当提高。

表 4-1 边坡安全系数要求^[1]

Table 4-1 Requirement of slope safety factors^[1]

边坡工程安全等级	一级边坡	二级边坡	三级边坡
平面滑动法	1.35	1.30	1.25
折线滑动法			
圆弧滑动法	1.30	1.25	1.20

从以上分析可知, 条分法的计算工作量很大, 需要计算出很多个圆弧滑动面, 以便从中找出最危险的滑动面。

为了简化计算, 一些学者就如何简便找出最危险的滑动面的问题进行了研究工作, 现介绍一下几种方法:

1) 简化毕肖普(Bishop)法^[53], 该方法考虑了土条间的作用力, 这是对传统的瑞典条分发的重要改进。该方法忽略各土条之间的切向条间力, 认为条间力的合力是水平的, 同时假设破坏面是圆弧面, 且定义边坡安全系数为沿整个滑动面上的抗剪强度与实际产生的剪应力的比值。该方法的计算结果比较接近实际, 常用于土质、软岩质及碎岩边坡的稳定性分析;

2) 间布(Janbu)法^[54, 55], Janbu 提出了同时满足力和力矩平衡的“通用条分法”。这一方法区别于其他方法的一个重要方面, 就是通过假定土条侧向力的作用点而不是作用方向来求解安全系数。采用非圆弧面, 按条块滑动平衡确定条间力;

3) 剩余下滑力法^[56], 剩余下滑力是指滑坡体向下滑动的力与抵抗向下滑动力之差。剩余下滑力计算常用折线法, 又称传递系数法。这种方法适用于斜坡土石体沿坚硬的土层或岩层层面滑落时, 滑动面已知的情况。计算时假定: 滑动面为折线形; 滑体作整体滑动, 不考虑相互间的挤压和拉裂; 滑坡推力方向平行于相应各段画面的方向, 作用点位于两段界面的中点; 顺滑坡主轴取 1m 宽的土片作为计算的基本截面, 不考虑截片两侧面的摩擦力; 建立公式时, 假设滑体处于平衡状态。

4.3 边坡稳定性数值模拟及分析

4.3.1 SLOPE/W 程序简介

SLOPE/W 是一个功能强大的土质边坡稳定性分析程序^[57]。该程序应用极限平衡方法,能对复杂的土层和滑动面形状及多种孔隙水压力状况建立二维计算模型,对边坡进行稳定性分析。

SLOPE/W 可以考虑地下水、土体裂缝等影响边坡稳定性的因素。用 SLOPE/W 进行边坡稳定性分析,首先根据岩土工程勘察资料提供的剖面图,确定研究区域的几何尺寸,建立二维几何模型。

滑动面的定义有两种方法:

第一种,根据工程地质条件和经验定出一系列可能的滑动面的切线及与之对应的滑动中心,程序采用“地毯式”的搜索方法得到临界滑动面的组合。该分析方法的破坏滑动面均为圆弧形。

第二种,根据岩土工程勘察资料,经过边坡软弱部位作出折线滑动面,并给定一个滑动中心, SLOPE/W 可以同时定义几个可能滑动面,来确定临界滑动面。

SLOPE/W 采用条分法,计算边坡的安全系数效率高,同时,该程序的可视图形化界面能够使我们直观的看到最危险滑动面、对应的滑动中心的位置和相应的安全系数。

对于稳定性不足的边坡,该程序提供了锚杆、挡土墙等支护方法,并可重新计算出经过治理以后边坡的安全系数,验证加固治理方案是否满足工程要求。

对于滑坡体程序要求在对滑坡体进行分层,各层土服从 Mohr-Coulomb 破坏准则,最下土层的下部还应有一层力学模型为 Bedrock 的土层,即保证滑动面的可能范围,不可通过基岩。

4.3.2 支护前后边坡稳定性数值模拟

攀田高速公路所监测边坡边坡的基本资料,加固资料和光纤监测资料,参照四川省交通厅公路规划勘察设计院的设计书和图纸。边坡高度根据四川省勘察设计院图纸,边坡地质情况均为全~强风化石英闪长岩边坡,由于岩

层风化破碎、节理发育，边坡开挖后易产生滑坍，因此对边坡采取防护加固措施，攀田高速公路路堑边坡土质物理力学参数^[58]见表 4-2。

表 4-2 边坡岩体物理力学性质

Table 4-2 Mechanical & physical parameters of rock mass

岩性	物理力学指标	天然内聚力 (kPa)	天然摩擦角 (°)	天然容重 (kN/m ³)
粉砂岩夹细砂岩	新鲜	600	45	26.3
	中风化	400	40	
	强风化	200	35	
中粒砂岩	新鲜	1200	52	26.70
	中风化	1000	49	
	强风化	800	44	
含煤含石中粒砂岩	新鲜	1100	50	25.00
	中风化	100	48	
	强风化	700	45	

所监测边坡中的 8 个边坡监测形式为锚杆监测，锚杆的型号、锚固方式、长度、数量见表 4-3。

表 4-3 边坡锚杆型号和数量

Table 4-3 Type and quantity of anchors

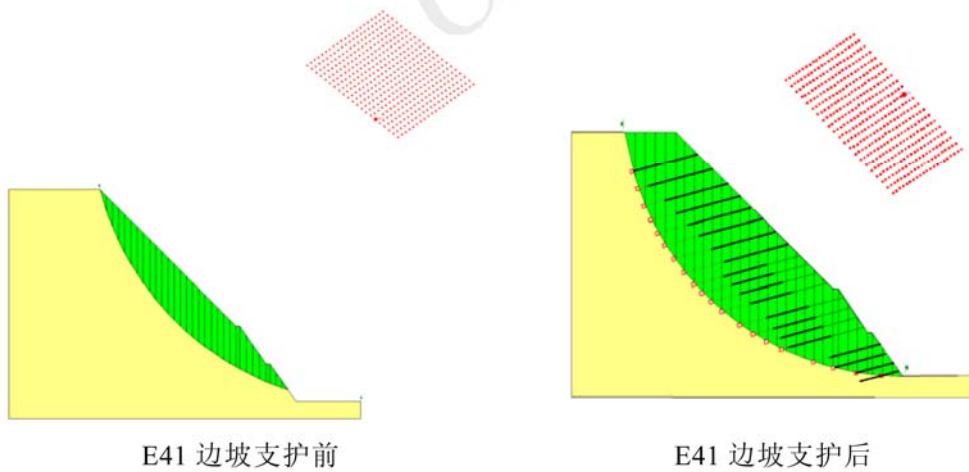
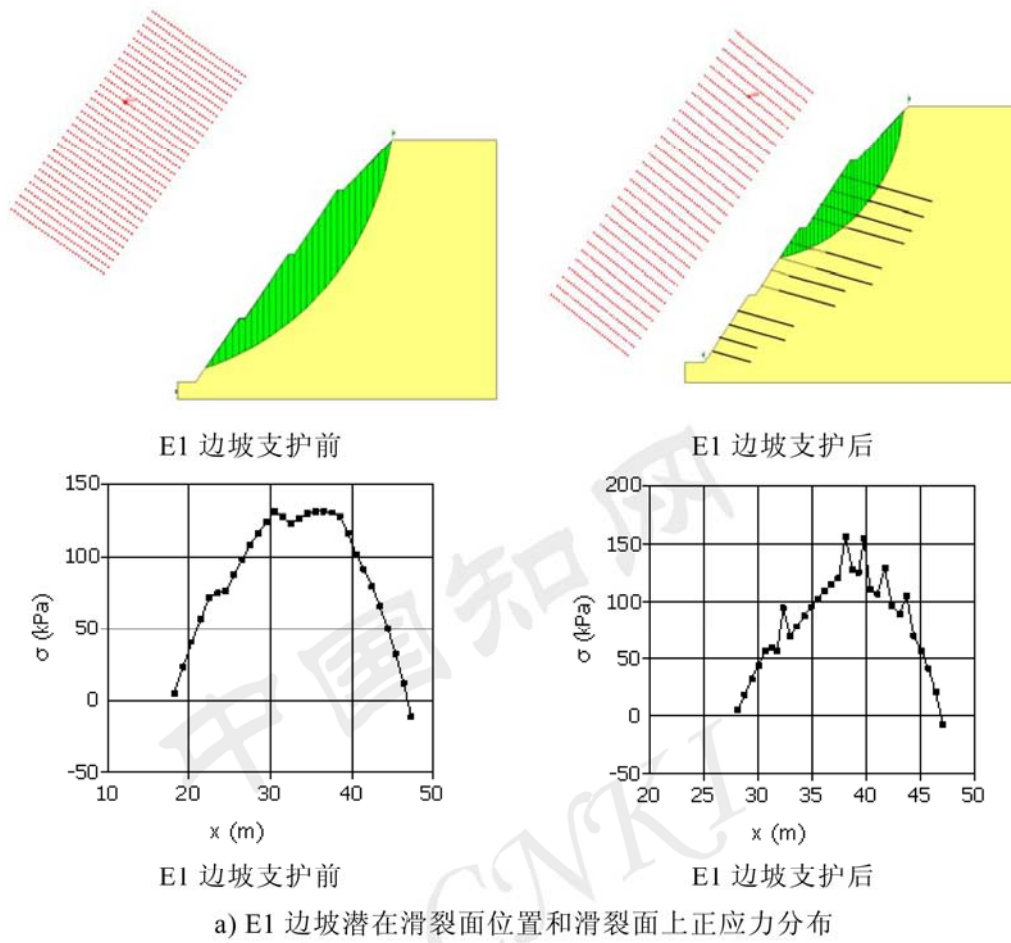
边坡编号	位置	施工方法	类型(mm)	长度(m)	数量(根)
E1	第一级边坡	压力注浆	Φ 28	6	2
				9	2
	第二级边坡	预应力	Φ 32	12	2
				15	2
	第三级边坡	预应力	Φ 32	15	4
E41	第一级边坡	压力注浆	Φ 28	9	2
				12	2
	第二级边坡	预应力	Φ 32	18	8
	第三级边坡	压力注浆	Φ 28	15	8
E42	第一级边坡	压力注浆	Φ 28	6	2
				9	2
	第二级边坡	预应力	Φ 28	14	8

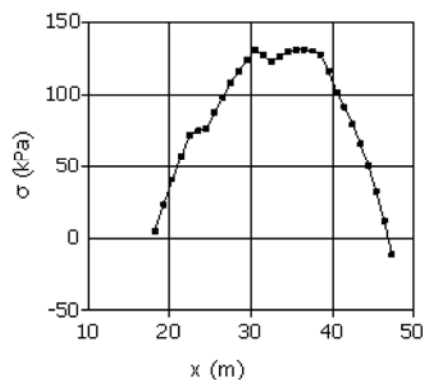
续表 4-3

E42	第三级边坡	预应力	$\Phi 32$	15	5
	第四级边坡	压力注浆	$\Phi 28$	12	4
E43	第一级边坡	压力注浆	$\Phi 28$	6	2
			$\Phi 32$	9	2
	第二级边坡	预应力	$\Phi 32$	12	4
	第三级边坡	预应力	$\Phi 32$	15	4
E51	第一级边坡	压力注浆	$\Phi 28$	6	2
				9	2
	第二级边坡	预应力	$\Phi 32$	15	4
	第三级边坡	预应力	$\Phi 32$	15	4
E61	第四级边坡	压力注浆	$\Phi 28$	12	4
	第一级边坡	压力注浆	$\Phi 28$	6	1
				9	2
	第二级边坡	预应力	$\Phi 32$	12	2
E62	第二级边坡	预应力	$\Phi 32$	15	2
				16	4
	第三级边坡	预应力	$\Phi 28$	16	4
	第四级边坡	预应力	$\Phi 28$	16	4
E62	第一级边坡	压力注浆	$\Phi 28$	6	1
				9	2
	第二级边坡	预应力	$\Phi 32$	16	4
	第三级边坡	预应力	$\Phi 28$	16	4
E62	第四级边坡	预应力	$\Phi 32$	15	4
				15	4

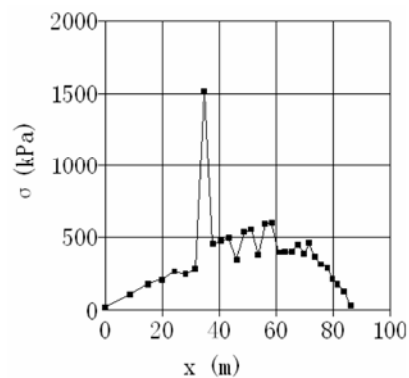
注：锚杆钢筋均为：HRB335

根据四川省交通厅公路勘察设计院所提供的图纸画出各个边坡的几何图形，输入材料的属性，分别对攀田告诉公路锚杆监测的 8 各边坡建立模型，通过 lines 赋予材料属性，划定边坡的求解范围对未支护边坡进行数值模拟，对于支护后的边坡，根据设计院图纸设定个锚杆的长度，极限锚固力，锚杆角度，锚固端长度等参数，对所有 8 个边坡建立数值分析模型，运算得到不同方法下的边坡最小安全系数，本文中所取结果为所有计算方法中最小的安全系数，模拟得到各边坡支护前后的最小安全系数下的潜在滑裂面位置如图 4-1 所示。



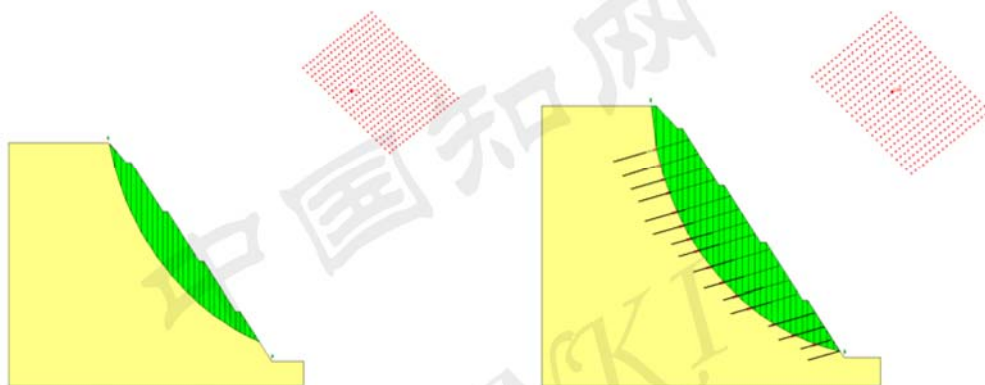


E41 边坡支护前



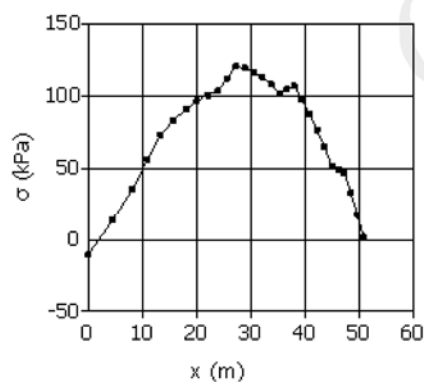
E41 边坡支护后

b) E1 边坡潜在滑裂面位置和滑裂面上正应力分布

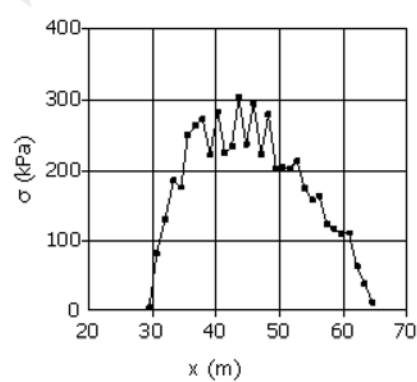


E42 边坡支护前

E42 边坡支护后

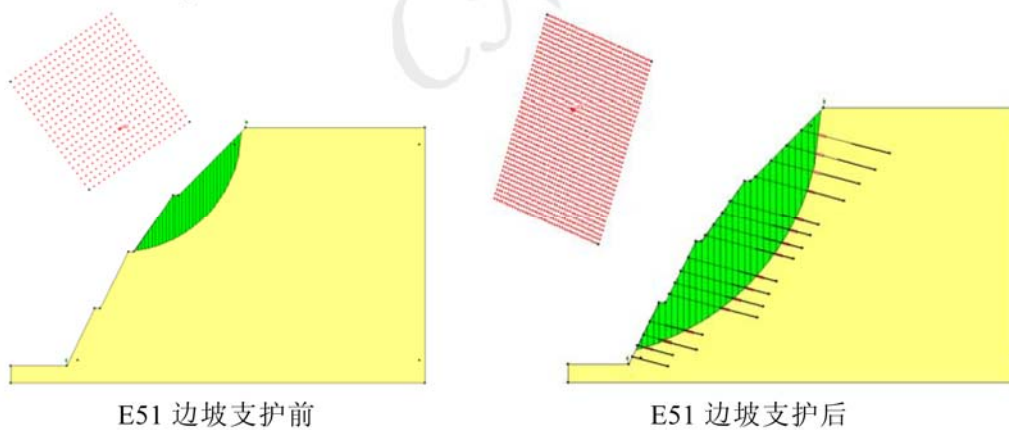
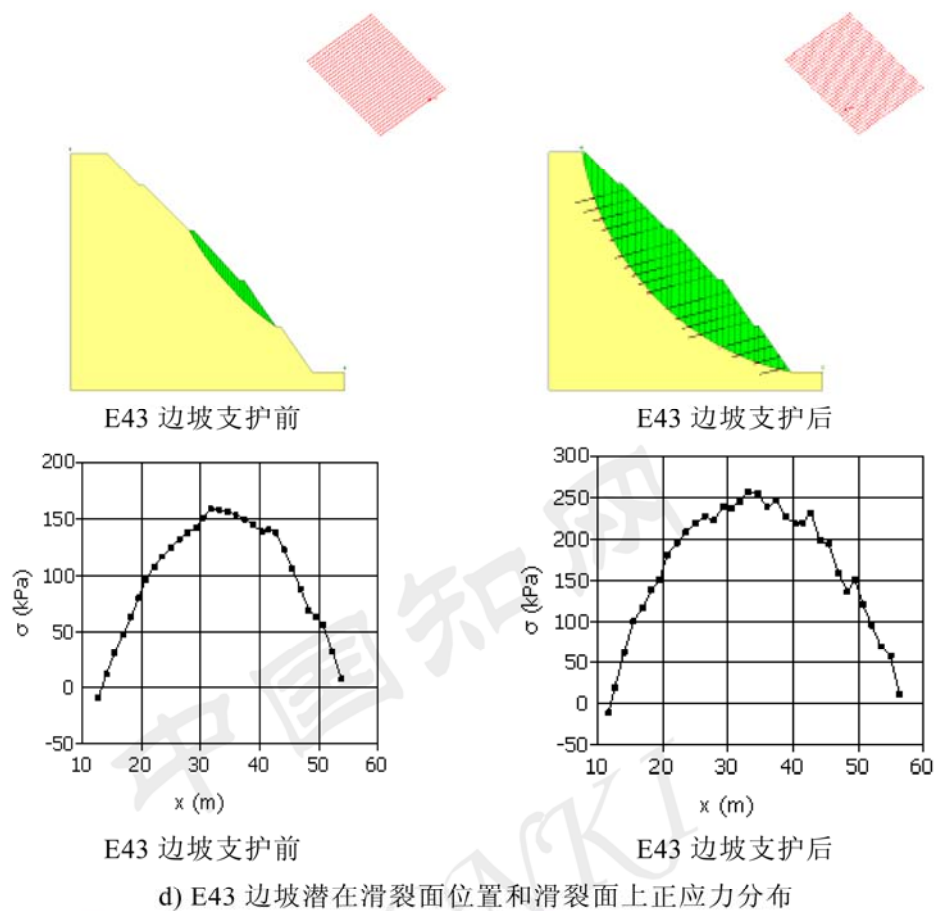


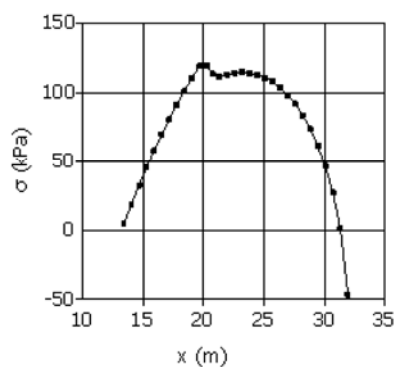
E42 边坡支护前



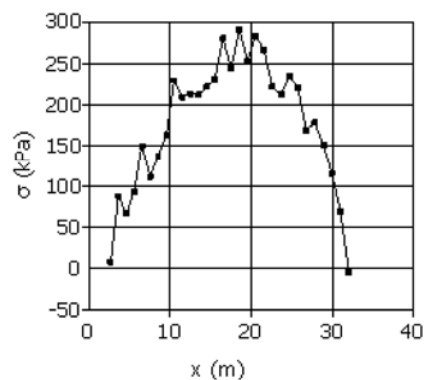
E42 边坡支护后

c) E42 边坡潜在滑裂面位置和滑裂面上正应力分布



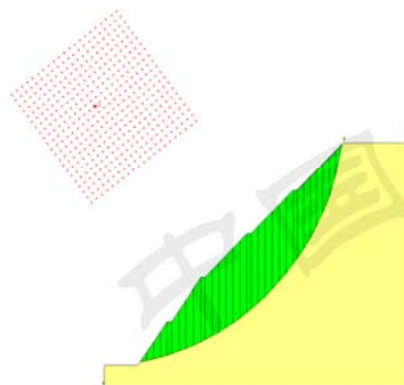


E51 边坡支护前

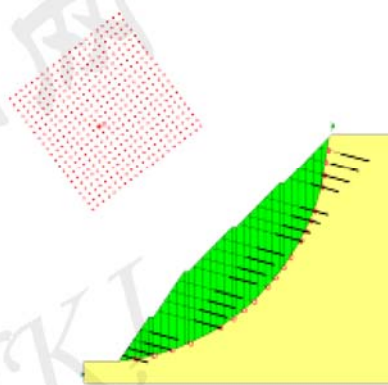


E51 边坡支护后

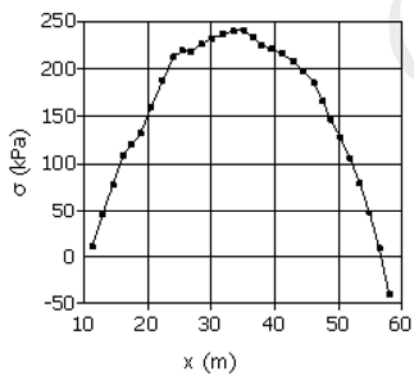
e) E1 边坡潜在滑裂面位置和滑裂面上正应力分布



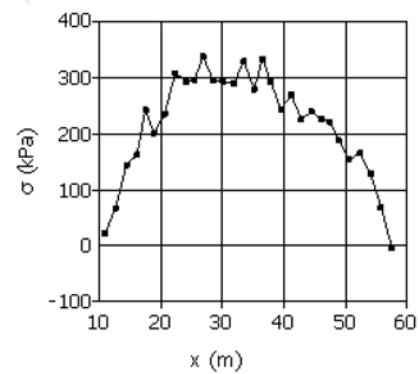
E52 边坡支护前



E52 边坡支护后

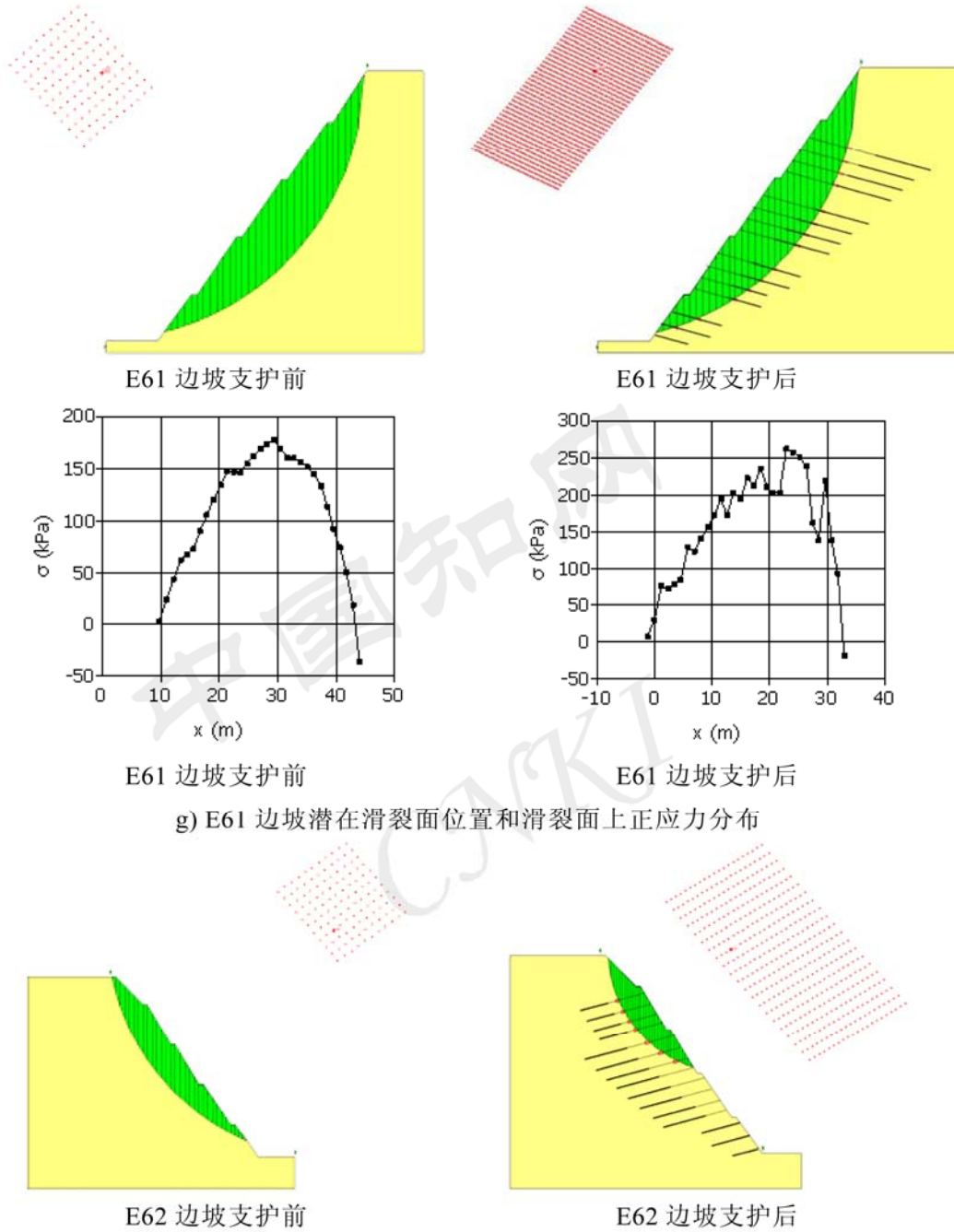


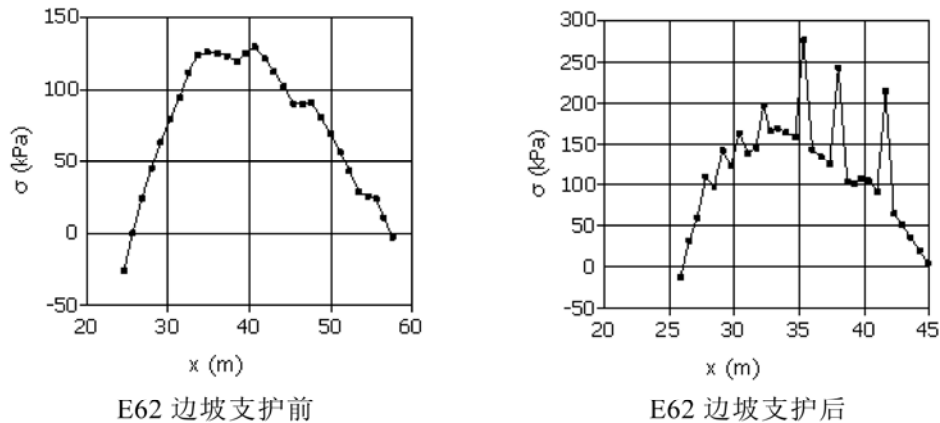
E52 边坡支护前



E52 边坡支护后

f) E5 边坡潜在滑裂面位置和滑裂面上正应力分布





h) E62 边坡潜在滑裂面位置和滑裂面上正应力分布

图 4-1 边坡支护前后潜在滑裂面位置和正应力变化曲线

Figure4-1 Positions of potential slip surface and distribution of normal stress

注 图 4-1 所有边坡均为锚杆支护，监测对象均为锚杆。

对支护工程完成后的边坡进行数值模拟，锚杆锚固长度按照设计值计算，其中预应力锚杆锚固段长度设计值为 6.5 米，压力灌浆锚杆为全长灌浆，因此锚固段为整根锚杆的长度。根据攀田高速公路设计图纸以及现场施工情况对所有监测边坡支护后的稳定性进行评价，从而确定支护前后各个边坡的最小安全系数见表 4-3。

表 4-3 支护前后边坡最小安全系数对比

Table 4-3 Minimum safety factor of slopes before and after reinforcement

边坡里程	E1	E41	E42	E43	E51	E52	E61	E62
F_s 支护前	0.772	0.839	0.878	0.872	1.563	0.847	0.798	0.752
F_s 支护后	1.829	1.335	1.047	1.327	1.676	1.079	1.371	1.070
监测形式	锚杆							

以上为 8 个锚杆监测边坡，根据各个边坡的地质情况分别算得支护前后边坡的最小安全系数，由支护前边坡边坡的数值模拟结果可以看出，开挖后边坡安全系数除 E51 边坡外均小于 1，边坡时刻有滑坡的可能。

支护后边坡安全系数有较大的提高，支护后的边坡大多满足规范中对于边坡安全系数的要求，但其中 E42、E52、E62 边坡安全系数未能达到最小安全系数要求，施工操作平台的影响。

由此可以看出各个边坡加固前后的潜在滑裂面位置，其中 E42、E43 边坡锚杆承受较大的下滑力，对边坡安全起了重要作用，达到了支护效果，边

坡 E52、E43 锚杆长度偏短, 没有达到最佳的锚固效果, E1 边坡三级坡顶部应进行支护。

4.3.3 施工平台对最小安全系数的影响

支护后边坡安全系数低的主要原因是滑裂面土条选择在施工操作平台上, 本文所监测边坡均属于全风化石英散沙盐, 攀枝花地区降雨量丰富, 特别是雨季, 每个边坡的平台随着降雨将逐渐被冲刷掉。因此本文对去除平台后的边坡进行了稳定性分析得到各个边坡最小安全系数和潜在滑裂面, 如图 4-2 所示。

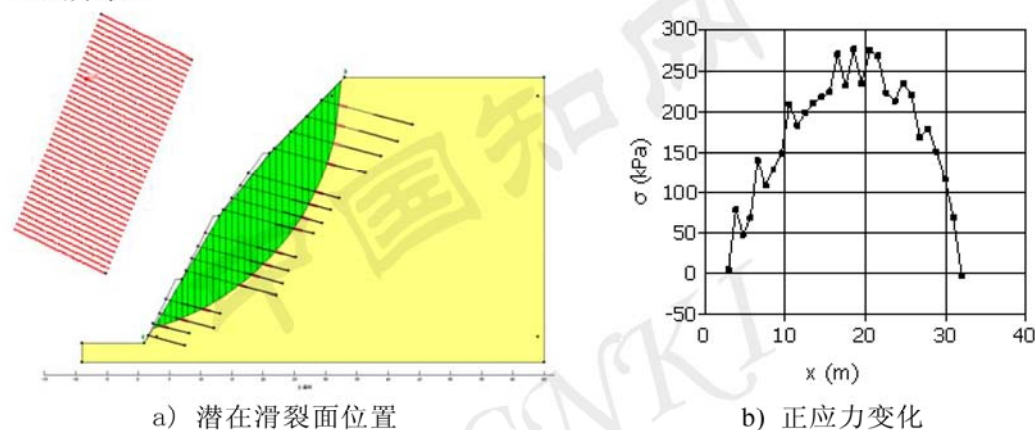


图 4-2 去除施工操作平台后 E5(1) 边坡最小安全系数为 1.709

Figure4-2 The Minimum safety of E5(1) slope is 1.709

去除施工操作平台前后, 锚杆所监测边坡的最小安全系数见表 4-4。

表 4-4 施工操作平台对边坡最小安全系数的影响

Table 4-4 The affection of work platform to minimum safety factor

边坡里程		E1	E41	E42	E43	E51	E52	E61	E62
F_s	支护后	1.829	1.335	1.047	1.327	1.676	1.079	1.371	1.070
	无平台	1.784	1.327	1.984	1.345	1.709	1.360	1.415	1.326
	监测形式	锚杆							

去除施工操作平台, 避免了在搜索滑裂面时, 土条集中在平台上, 造成所计算结果取值远远小于实际边坡安全系数, 因此, 各个边坡的安全系数有了较大的提高, 支护前后边坡锚杆承担了部分受力, 支护效果较好。

4.3.4 边坡锚杆锚固长度的探讨

根据现场施工实际灌浆情况, 12 米、15 米预应力锚杆实际灌浆长度均为 9 米, 据此, 建立数值分析模型, 对各个边坡最小安全系数进行计算, 得到各个边坡的最小安全系数和潜在滑裂面位置, 如图 4-3 所示。

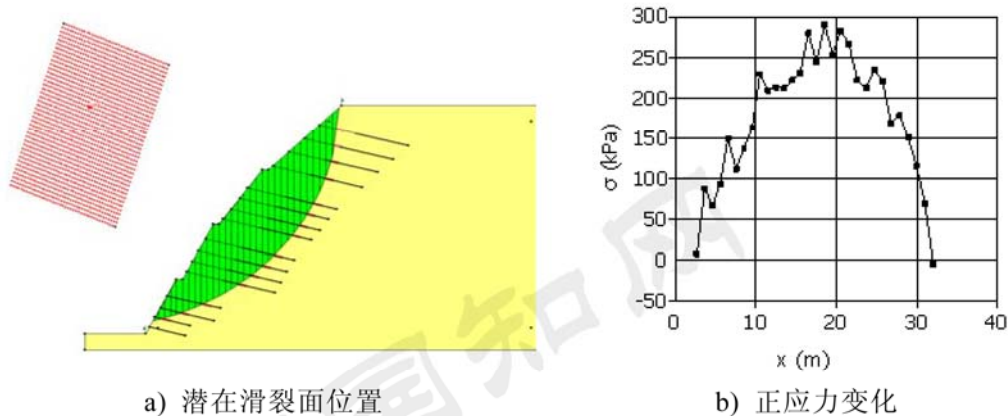


图 4-3 9m 长锚杆最小安全系数 1.675

Figure4-3 The minimum safety factor of 9m length anchor in E(1) slope is 1.675

该边坡所处位置为攀田(川滇界)高速公路 E5 合同段右侧, 其中: 一、四级边坡采用锚杆型号为 $\Phi 28$, 二、三级边坡采用 $\Phi 32$ 锚杆。

根据现场锚杆拉拔试验, E5 合同段 5 根压力注浆锚杆现场基本试验得到的锚固体与岩体界面摩阻力 c 为 206.7kPa。锚杆直径 D 为 110mm, 取安全系数为 $F_s=1.5$, 这样要达到安全荷载^[59]。

$T_a=100kN$ 和 165kN 的锚固长度如式 4-7:

$$L = \frac{T_a F_s}{\pi D c} = \frac{T_a}{3.14 \times 0.11 \times 206.7} \quad (4-7)$$

要达到安全荷载 $T_a=100kN$ 和 $T_a=165kN$ 的锚固长度分别为 2.01m 和 3.47m。设计锚固长度平均为 6.5m, 因此锚固安全荷载 $T_a=165kN$ 是安全的。土条锚杆受力情况如图 4-4 所示。

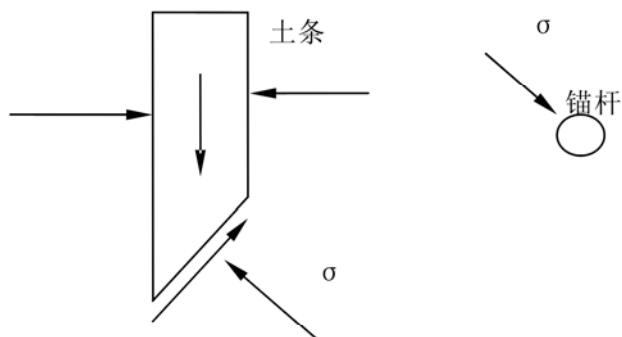
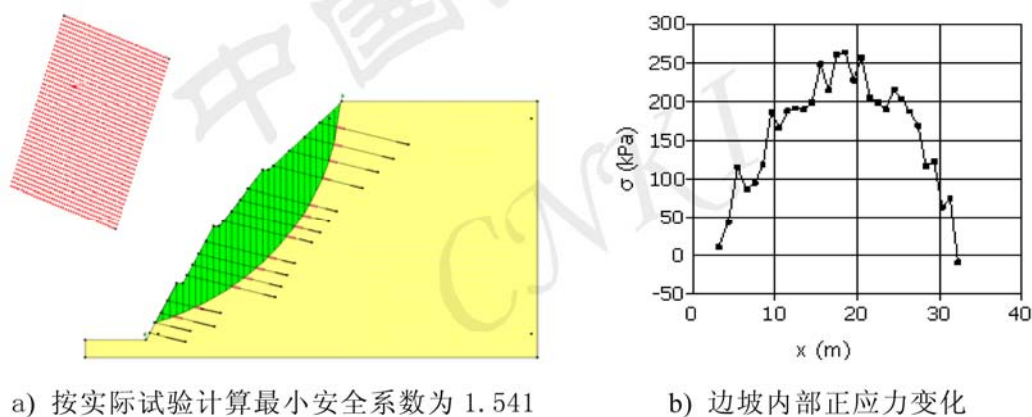


图 4-4 锚杆受力分析

Figure4-4 Force analysis of anchors

在 SLOPE/W 中建立模型，压力灌浆土钉的锚固长度为 3.47m，预应力锚杆的锚固长度为 2.01m 计算建立模型进行分析，计算结果如图 4-5 所示：



a) 按实际试验计算最小安全系数为 1.541

b) 边坡内部正应力变化

图 4-5 按锚杆拉拔实验模拟结果

Figure4-5 Numerical simulation result of E51 slope according to pull-out test

不同锚杆长以及锚杆拉拔试验所测得各边坡最小安全系数见表 4-5。

表 4-5 不同锚固端长度边坡安全系数

Table 4-5 Bond lengths of anchors in different slopes

边坡里程	E1	E41	E42	E43	E51	E52	E61	E62
F_s 无平台	1.784	1.327	1.984	1.345	1.709	1.360	1.415	1.326
9m 锚固段	1.951	1.531	1.473	1.924	2.191	1.447	1.621	1.718
拉拔试验	—	—	—	—	1.506	—	—	—
监测形式	锚杆							

模拟结果与现场锚杆拉拔试验所得边坡最小安全系数基本相等，证明了数值模拟的正确性。

锚杆实际施工过程中的锚固段长度 9 所得的边坡最小安全系数远大于设计值 6.5 米锚固端长度情况下的边坡最小安全系数，证明锚固段长度对于边坡锚固效果贡献很大。

4.4 本章小结

本章首先介绍了极限平衡原理，瑞典圆弧法、毕肖普法以及简布方法，根据现场岩土力学参数，利用 Geo-slope 软件中的 SLOPE/W 模块，建立各个边坡的模型，对支护前后的边坡进行了数值模拟，得到边坡的最小安全系数，边坡滑裂面位置土条的正应力曲线。

同时通过数值模拟对施工操作平台对边坡最小安全系数的影响进行了分析，同时根据现场锚杆拉拔试验数据对边坡锚杆锚固段长度进行了模拟，模拟结果与试验结果一致，说明了模型的正确性，考虑到攀枝花地区雨季时间长，对降雨引起的地下水位上涨对于边坡稳定性的影响进行了数值模拟，得到了地下水位抬高后，边坡的最小安全系数。

结 论

本文首先应用较为成熟的施工工艺完成了光纤布拉格光栅传感器工程现场安装布设,监测边坡支护锚杆应力应变,同时利用新型深部测斜仪对特殊地质情况的边坡进行监测,应用加拿大岩土软件 Geo-slope 中的 Slope/W 模块模拟得到边坡的潜在滑裂面位置,确保深部测斜仪的监测效果。

传感器安装完成后,定期对传感器数据进行采集,分析所采集到的数据,得到锚杆、深部测斜仪温度补偿后各测点的应变值,差分计算的方式对深部测斜仪的数据进行分析,从而求得深部测斜仪的挠度,通过建立最优化数学模型得到了最危险潜在滑裂面的位置。

最后,利用 SLOPE/W 模块对所监测边坡进行了数值模拟包括:边坡支护前后的边坡安全系数,锚杆锚固端长度、施工操作平台、地下水位等因素对于边坡最小安全系数的影响。

通过以上工作得到了如下结论:

1) 以室内试验为依据,差分方法计算每次加载所得挠度与高精度位移计之间的标准差在 0.001 左右。因此,差分方法很好的应用于深部测斜仪挠度求解中;

2) 利用非线性规划,建立最优化模型,求得各边坡的圆弧形潜在滑裂面位置。其中:

EI2边坡潜在滑裂面在坐标系中的位置为:

(0.000000, 1.037012), (13.34982, 16.71123), (0.36113, 35.00000)

EI3边坡潜在滑裂面在坐标系中的位置为:

(2.360900, 10.00000), (13.33413, 17.24661), (27.79533, 25.24661)

EI41边坡潜在滑裂面在坐标系中的位置为:

(0.02450000, 3.999999), (13.33526, 18.00000), (26.79953, 25.22824)

通过深部测斜仪实测数据求得边坡内部变形,为新型测斜仪的挠度计算提供了可靠的方法;

3) 施工操作平台对潜在滑裂面的迭代求解造成了影响,造成安全系数局部最优解,小于规范要求的最小安全系数 1.3。去除平台后,数值模拟所得各边坡最小安全系数均在 1.3 以上,边坡目前已达到稳定状态。

总之,通过现场监测和数值计算,为以后边坡变形监测提供了可靠的手段和方法,对锚杆锚固短长度的讨论为边坡工程锚杆支护提供了参考。

参考文献

- 1 中华人民共和国建设部.建筑边坡工程技术规范. GB50330-2002
- 2 毛斌. 高速公路边坡加固及防护技术. 浙江大学硕士学位论文. 2008, 5:1~3
- 3 冯学才, 郭安宁. 我国地震滑坡的一般特征. 中国铁道出版社, 1988:35~44
- 4 陈开圣, 彭小平. 测斜仪在滑坡变形监测中的应用. 岩土工程技术. 2006, 20(1):39~41
- 5 刘观仕, 胡德明, 徐光斌. 测斜仪在软基路堤施工检测中的应用. 土工基础. 2004,18(3):57~59
- 6 苑立波. 光纤光栅原理和应用. 光通信技术, 1998, 22(1):70~80
- 7 谢和平, 邓建辉. 汶川大地震灾害与灾区重建的岩土工程问题. 岩石力学与工程学报. 2008, 27(9):1781~1791
- 8 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算. 中国水利水电出版社, 1996:31~33
- 9 K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson. Photosensitivity in optical fiber waveguide application to reflection fiber fabrication. Applied Physics Letters. 1978, 32(10):647~649
- 10 B. S. Kawasaki, K O Hill, D. C. Hohnson. Narrow-band Bragg reflectors in opticalfibers. Optical letters. 1978, 3:66~68
- 11 A. Mendez, T. F. Morse, F Mendez. Applications of embedded optical fiber sensors in reinforced concrete buildings and structures. Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 1990, 1170:60~69
- 12 P. J. Lemaire, R. M. Atkins. High pressure H₂ Loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ Doped optical fibers. Electronics Letters. 1993, 29:1191~1203
- 13 R. L. Idriss. Monitorin of a smart bridge with embedded sensors during manufacturing, construction and serbice. Proceeding of the 3rd international workshop on structural health monitoring. Stanford University, 2001:604~613
- 14 P. Kronenberg, N. Casanova, D. Inaudi, S Vurpillot. Dam monitoring with fiber optic sensors. Smart structures and materials.3043:2~11

- 15 D. Inaudi. Application of Optical Fiber Sensor in Civil Structural Monitoring. The International Society for Optical Engineering. 4328:1~10
- 16 P. Ferraro, G. D. Natale. On the possible use of optical fiber Bragg grating as strain sensors for geodynamical monitoring. Optics and Lasers in Engineering. 2002, 37:115~130
- 17 E. Udd., M. Kunzler, M. H. Layor, W. Schulz, S. Kreger, J. Coronas, R. McMahon, S. Soltesz, R. Edgar. Fiber Grating Systems for Traffic Monitoring. The International Society for Optical Engineering, 4337:510~514
- 18 欧进萍. 土木工程结构智能材料、传感器与健康监测系统. 功能材料. 2004, 35:12~21
- 19 欧进萍等. 黑龙江呼兰河大桥的光纤光栅智能监测技术. 土木工程学报. 2004, 37(1):45~50
- 20 T. H. Chan, L. Yu, H. Y. Tam, Y. Q. Ni, S. Y. Liu. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation. Engineering structures. 2006, 28:648~659
- 21 林钧岫, 王文华, 王小旭. 光纤光栅传感技术应用研究及其进展. 大连理工大学学报, 2004, 44(6):931~936
- 22 F. A. Tavenas, Lateral displacement in clay foundations under embankment. Canadian Geotechnical Journal. 1979, 16(3):532~550
- 23 Xingmin Hou, Xueshan Yang, Qiao Huang. Using Inclinoimeters to Measure Bridge Deflection. Journal of bridge engineering, 2005, 10(5):564~569
- 24 M. Hisham, J. Peter, S. Kenichi, K. A. Assaf. Distributed Optical Fiber Strain Sensing in a Secant Piled Wall. Seventh International Symposium on Filed Measurements in Geomechanics. 2007:22~31
- 25 M. Nishio, T. Mizutani, N. Takeda. Structural shape identification using distributed strain data from PPP-BOTDA. Proceedings of The International Society for Optical Engineering. 2007, 6530:1~9
- 26 赵勇. 光纤光栅及其传感技术. 国防工业出版社. 2000:182~193
- 27 赵雪峰, 田石柱, 欧进萍. 光纤传感器在土木工程中的应用. 建筑结构. 2002, 5: 25~32
- 28 刘雄. 光纤传感技术在岩土力学与工程中的应用研究. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5):497~502
- 29 A. Othonos, K. Kalli. Fiber Bragg gratings: Fundamentals and applications in

- telecommunications and sensing. *Fundamentals of Nonlinear Behavioral Modeling for RF and Microwave Design*. 1999:1~3
- 30 靳伟, 廖延彪, 张志鹏等. 导波光学传感器: 原理与技术. 科学出版社, 1998:10~13
- 31 朱鸿鹄, 殷建华, 张林. 大坝模型试验的光纤传感变形监测. *岩石力学与工程学报*. 2008, 27(6):1188~1194
- 32 刘泉声, 徐光苗. 光纤测量技术在岩土工程中的应用. *岩石力学与工程学报*. 2004: 43~46
- 33 信思金, 李斯丹, 舒丹. 光纤 Bragg 光栅传感器在锚固工程中的应用. *华中科技大学学报(自然科学版)*. 2005, 3(3):75~78
- 34 中华人民共和国行业标准. 建筑基坑支护技术规程. JGJ120-99
- 35 J. H. Yin, H. H. Zhu, W. Jin. Performance evaluation of electrical strain gauges and optical fiber sensors in field soil nail pullout tests. *Geotechnical Advancements in Hong Kong since 1970s, the HKIE Geotechnical Division 27th Annual Seminar*. Hong Kong. 2007: 249~254
- 36 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 贾志欣, 王玉杰. 岩质边坡稳定分析. 北京:中国水利水电出版社, 2005:51~57
- 37 M. Morey, G. Meltz, W. Gkenn. Formation of Bragg Grating in optical fiber by UV expose through a phase mask. *Appllication .Physics. Letters*. 1993, 62(10):1035~1037
- 38 李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术. 中国建筑工业出版社, 2008:47~52
- 39 张志涌. 精通 Matlab 6.5 版. 北京航空航天大学出版社, 2003:149~152
- 40 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学. 高等教育出版社, 1994:269~272
- 41 S. Geza An iterative time-stepping method for sol-ving first-order time dependent problems and its appli-cation to the wave equation. *Journal of Computa-tional Acoustics*, 2000, 8(1):241~255
- 42 P. Modesti, A. Sciomachen. A utility measure for finding multi-objective shortest paths in urban multimodal transportation network. *European Journal of Operational Research*. 1998, 13(111) :495~508
- 43 谢金星. 薛毅. 优化建模与 LINDO/LINGO 软件. 清华大学出版社 2005:101~125
- 44 陈祖煜. 土质边坡稳定分析. 中国水利水电出版社, 2003:15~93

- 45 高涛. SLPE/W 程序在土质边坡稳定性分析中的应用. 西安科技大学学报. 2006, 2(2):184~188
- 46 U.S.Army. Stability of slopes and foundations. U.S.Army Corps of Engineers EngineeringManual, 1967:15(3):7~13
- 47 姜德义, 朱合华, 杜云贵. 边坡稳定性分析与滑坡防治. 重庆大学出版社, 2005:85~97
- 48 J. M. Duncan. State of the art:limit equilibrium and finite element analysis of slopes. Journal of Geotech. 1996, 122(7):577~596
- 49 S. K. Sarma. Stability analysis of embankments and slopes. J. Geotech. Engineering. Division. 1979, 105(12):392~398
- 50 时卫民. 郑颖人. 摩尔-库仑屈服准则的等效变换及其在边坡分析中的应用. 岩土工程技术. 2003, 3: 155~159
- 51 K Terzaghi. Stability of slopes of natural clay. Proceed 1st International conference. Soil Mechanics Found. 1936,1:161~171
- 52 W. Fellenius. Calculation of the stability of earth dams. Proceeding of 2nd Congr Large Dams. 1936:445~462
- 53 A. W. Bishop. The use of the slip circle in the stability analysis of earthslopes. Geotechnique, 1955(1):7~17
- 54 N. Janbu. Slope stability computations. Hirschfield E, Poulos Sed. Proceed of Embankment Dam Engineering. 1973:47~86
- 55 N. Janbu, L. Bjerrum, B. Kjaernsli. Soil Mechanics Applied to Some Engineering Problems. Norwegian Geotechnical Institute Publication. 1956:12~21
- 56 N. R. Morgenstern, V. E. Price. The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique. 1965, 15(1):79~93
- 57 Geo-slope. SLOPEW Engineering Book, Version 1 .Canada: GEO-SLOPE/W International, LTD, 2004:1~40
- 58 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院. 攀枝花至田房(川滇界)高速公路路边坡防护设计图. 2007,3

攻读学位期间发表的学术论文

- 1 裴华富, 凡友华. 考虑温度场的软土固结有限元模拟研究. 路基工程. (修改中)
- 2 裴华富, 凡友华. 油田开发规划的合理编制问题研究. 大庆石油地质开发 (已录用)
- 3 裴华富, 凡友华. 线性流量阀的内筒设计问题研究. 石油和化工设备. (已录用)

中国知网
CNKI

哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《高速公路高边坡 FBG 传感器监测及稳定性分析》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签字：

日期： 年 月 日

哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书

《高速公路高边坡 FBG 传感器监测及稳定性分析》系本人在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨工业大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨工业大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，同意学校将论文加入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》和编入《中国知识资源总库》。本人授权哈尔滨工业大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以上相应方框内打“√”）：

保密□，在 年解密后适用本授权书

不保密□

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

致 谢

本文研究工作的顺利完成,首先感谢我的导师凡友华副教授,在课题研究过程中,凡老师的给予我足够的关心和支持,从课题选题、理论研究到文献的查找,都凝聚了凡老师无尽的心血和汗水。

本课题来源于作者副导师香港理工大学殷建华教授攀枝花至田房高速公路监测项目,在现场实验阶段,殷建华教授为本课题的研究提供了现场实验的条件,资金上的支持。同时,感谢香港理工大学土木工程学科部岩土工程专业博士生朱鸿鹄、洪成雨在现场试验阶段给予本课题的大力帮助帮助和指导,在论文研究工作中,与他们进行了深入的探讨,从他们实际项目经验得到了不少启发。

借此机会感谢研究生期间给我传授过专业课的土木工程专业所有老师,高山仰止,景行行止,各位老师做人做事的严谨、负责的态度,为我以后的人生道路指明了努力的方向。

论文的撰写过程中还得到了结构与岩土研究中各位师兄、师姐和其他同学的热情帮助,感谢他们为本文的研究工作所付出的辛勤劳动。

感谢一直在支持我,鼓励的父母,姐姐、女友和我的所有亲人,他们一直在默默无闻的为我付出,在彷徨的时候,他们为我提供了继续探索的勇气,在最后的冲刺阶段,他们的嘘寒问暖给我足够的动力去拼搏奋进,在现场工地的辛劳,他们的每次交谈都凝聚着力量,给我完成如此巨大项目的信心。

在此向辛勤培育我成长的母校、导师和领导们致以由衷的感谢和崇高的敬意。

裴华富

2008-12-19