

工学硕士学位论文

高速公路高边坡 FBG 传感器监测及稳定性分析

HIGH SLOPE MONITORING USING FBG SENSORS AND
ITS STABILITY ANALYSIS

裴华富

2008 年 12 月

国内图书分类号: TD824.7+3

国际图书分类号: 624

工学硕士学位论文

高速公路高边坡FBG传感器监测及稳定性分析

硕士研究生: 裴华富
导师: 凡友华副教授
副导师: 殷建华教授
申请学位: 工学硕士
学科、专业: 结构工程
所在单位: 深圳研究生院
答辩日期: 2008年12月
授予学位单位: 哈尔滨工业大学

Classified Index: TD824.7+3

U.D.C: 624

Dissertation for the Master Degree of Engineering

HIGH SLOPE MONITORING USING
FBG SENSORS AND ITS STABILITY
ANALYSIS

Candidate:	Pei Huafu
Supervisor:	Associate Prof. Fan Youhua
Associate Supervisor:	Prof. Yin Jianhua
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Specialty:	Structure Engineering
Affiliation:	Shenzhen Graduate School
Date of Defence:	December, 2008
Degree-Confering-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘要

本文应用光纤布拉格光栅传感器对攀枝花至田房(川滇界)高速公路(简称为攀田高速)12 个高边坡进行健康监测。采用 FBG 制作新型深部测斜仪,并应用到边坡监测中,研究采用新的方法计算深部测斜仪的挠度,建立优化模型来求解潜在滑裂面的位置。同时,利用 Geo-slope 软件中的 SLOPE/W 模块对边坡进行稳定性分析。研究内容及成果如下:

1) 分别在深部测斜仪及锚杆安装光纤布拉格光栅应变和温度传感器,数值模拟分析确定深部测斜仪在边坡上的布设位置,采集监测数据,根据光纤布拉格光栅波长与应变之间的关系公式,得到锚杆、深部测斜仪各测点的点应变。引入差分方法计算测斜仪挠度,通过实验室标定,与文献中方法进行对比,验证差分方法的优越性,然后利用差分方法计算得到深部测斜仪挠度值。

2) 对离散的挠度数值进行多项式拟合,以挠度与深部测斜仪所在直角坐标系中的相应位置为约束条件,建立最优化数学模型,利用 Lingo 软件求解,得到圆弧形潜在滑裂面的位置。

3) 对攀田高速公路所监测高边坡进行数值模拟,算得支护前后边坡的最小安全系数,考虑施工操作平台等因素对边坡稳定性的影响,针对现场的锚杆灌浆长度,分别对不同锚固段长度进行数值模拟,为以后的边坡支护提供参考依据。

本文首次利用 FBG 制作深部测斜仪,并对其精度进行分析,利用差分方法计算挠度,为以后的监测数据处理提供手段;对加固前后的边坡进行数值模拟,及时评估加固后边坡的稳定性和安全性,降低滑坡风险。

关键词 光纤 Bragg 光栅传感器; 差分方法; 最优化模型

Abstract

In this paper, we used fiber-optic Bragg grating sensors to monitor 12 high slopes belong Pan-Tian (Sichuan-Yunnan border) highway. We used FBG to make a new type of inclinometer. We also have done some research on the calculation method of inclinometers deflection, set up an optimal mathematic model to compute out the potential slip surface. Then used the SLOPE/W module of Geo-slope software to simulate the stability of these slopes. Research content and results are as follows:

1) We have made and installed strain and temperature sensors onto anchors and inclinometers respectively. Determined the positions of Inclinometers according to numerical simulation analysis. We analyzed data, calculated out the force and deformation of anchors and inclinometer through the relationship between wavelength and strain. Then, we established a numerical model to derive the position of potential slip surface.

2) We also have fitted the discrete data by polynomial, took coordinate of inclinometers as constraints, set up optimal model to calculate out the position of potential slip surface.

3) At last, we have done some numerical simulation on slopes monitored besides Pan-Tian highway road, calculated out the minimum safety factor considering of work platform and so on. About the length of different bonds, we have done some numerical simulation about various bonds, supplied the reference for design and construction afterward.

In this thesis, we used differential method to calculate the deflection of inclinometers firstly. Meanwhile, we analyzed the accuration of this method, so we supplied an mthod for monitoring. Then we had done some numerical simulation on slopes reinforced and not reinforced, evaluated the stability of slopes punctually, supplied reference for design and construction afterward.

Keywords Optical Fiber Bragg Grating sensor, differential method, optimization model

目 录

摘 要	I
Abstract.....	II
 第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题背景和来源.....	1
1.2 本课题研究的目的和意义	2
1.3 国内外研究现状.....	3
1.4 本文主要研究内容.....	5
第 2 章 光纤布拉格光栅传感器现场安装及布设	7
2.1 引言	7
2.2 攀田高速公路边坡工程概况	7
2.3 光纤布拉格光栅传感器的原理及制作	8
2.3.1 光纤布拉格光栅传感器简介	8
2.3.2 光纤光栅的基本结构	10
2.3.3 光纤布拉格光栅的制作	11
2.3.4 光纤布拉格光栅传感器工作原理	12
2.4 光纤传感器的现场安装布设	13
2.4.1 光纤布拉格光栅在锚杆上的安装	13
2.4.2 光纤布拉格光栅传感器在深部测斜仪上的安装布设	16
2.5 数据采集	22
2.5.1 数据采集时间安排	22
2.5.2 监测数据现场采集	22
2.6 本章小结	24
第 3 章 深部测斜仪挠度及锚杆受力分析	25
3.1 引言	25
3.2 锚杆受力分析	25
3.2.1 锚杆监测数据分析	28
3.2.2 失稳边坡锚杆安全性评定	39
3.3 深部测斜仪监测数据挠度求解	42
3.3.1 深部测斜仪挠度求解公式	42

3.3.2 差分方法求解深部测斜仪挠度	43
3.3.3 差分方法的实验验证	45
3.3.4 实验误差分析	46
3.3.5 实测边坡挠度	47
3.4 最优化模型的建立及求解	51
3.4.1 最优化模型的建立	51
3.4.2 非线性规划模型的求解	54
3.5 本章小结	55
第4章 边坡稳定性分析	56
4.1 引言	56
4.2 数值分析模型的建立	56
4.2.1 极限平衡分析的垂直条分法	57
4.2.2 数值分析模型的建立	57
4.3 边坡稳定性数值模拟及分析	60
4.3.1 SLOPE/W程序简介	60
4.3.2 支护前后边坡稳定性数值模拟	60
4.3.3 施工平台对最小安全系数的影响	69
4.3.4 边坡锚杆锚固长度的探讨	70
4.4 本章小结	72
结 论	73
参考文献	74
攻读学位期间发表的学术论文	78
哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明	79
哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书	79
致 谢	80

第1章 绪论

1.1 课题背景和来源

边坡是在建筑场地或其周边,由于建筑物和市政工程开挖或填筑施工所形成的人工边坡和对建筑物安全或稳定又影响的自然边坡,人民的生产和生活与边坡发生着紧密的联系^[1]。

边坡失稳造成的滑坡、崩塌是十分严重的全球性自然灾害。它常常摧毁建筑,堵塞交通。造成人员伤亡,给生态环境工程和工程建这带来危害,造成巨大的经济损失。滑坡是地壳表层边坡的一种灾害地质现象,往往出现在山区和丘陵地带,尤其是高山峡谷地带,其区域分布受到地球动力学背景和动力作用过程的控制,而其形成和演化主要与外应力,诸如浅表层改造、风化、卸荷、地下水以及人类活动等密切相关。在全球范围内滑坡分布广泛,危害严重。

我国是个多山的国家,山地约占全国面积的 2/3,是世界上滑坡较多的国家之一。随着国民经的蓬勃发展,各项工程活动山体地质环境往往起着破坏性的作用。在铁路、公路、水利、航运、采矿、建筑以及国防建设中经常遇到边坡稳定问题,它关系到工程建设的安全和经济效益的高低。由于边坡的失稳未加控制而肇事的事例屡见不鲜。据不完全统计:过去十年,我国至少发生 850 次以上危害和影响重大的边坡失稳破坏,每年因滑坡、崩塌造成的经济损失高达 30 亿-50 亿美元^[2]。

关于滑坡的分类,各部门根据系统工程的特点,结合滑坡体的组成物质、力学性能、滑动速度、滑体形态、滑体规模、滑体厚度、滑体与岩层的关系等因素,提出了各自的分类。按照滑坡体物质组成为:堆积层滑坡、残积层滑坡、黄土滑坡、粘性土滑坡、堆积土滑坡、破碎岩石滑坡、岩石滑坡,按滑坡的厚度可以分为:浅层滑坡、中层滑坡、深层滑坡^[3]。

多年来,边坡稳定性研究的边坡失稳监测预报一直是国内外学者关注的热门话题。特别是进入 20 世纪 80 年代以后,引用相关学科的先进理论和方法进行滑坡预报的探索,不断引起岩土工程界特别是边坡工程研究者的兴趣。然而滑坡预报涉及到边坡稳定性研究的许多理论和方法,也是滑坡研究领域难度最大的课题。由于地质、水文地质条件的复杂性以及边坡变形破坏的多

样性、随机性和不确定性,要想准确预报滑坡的时间非常困难。迄今为止,国内外学者在滑坡预报研究中,尽管进行了许多有重要价值的探索和尝试,但准确预报实例仍十分少见。目前,还没有比较成熟的且能适应各种变形的预报方法和实践经验,无论是预报理论还是预报技术都有待进一步探讨和深入研究。因此人们不得不承认目前滑坡预报问题仍未得到很好的解决。

边坡内部应力变化是边坡变形破坏的本质反映。边坡在变形破坏过程中,内部应力会不断调整 and 变化,按理内部应力也是一种预报参数,但是对于这方面研究太少,对于边坡内部力学状态的监测成为当务之急。

现有锚杆锚索测力传感器主要有电阻应变计式、差动电阻应变计式和钢弦式等几种类型。这几种传感器由于存在长期稳定性差、信号不能远距离传输等缺点,不能很好满足工程监测需要。

土体测斜仪是以高精度伺服加速度计为敏感元件的滑动式测斜仪,深部测斜仪得发展经历了三个阶段:竖向测斜仪、斜坡测斜仪、水平测斜仪^[4]。

这些测斜仪存在较大的不足,需要人工读数,仪器出现漂移误差,测头导轮的轴磨损、偏移将产生一定的误差^[5],导轮转动受限或导轮弹性不足的情况下,如测头拉力与该测段的轴线存在较大夹角的情况下,测头中线偏离测斜管中线,将产生较大的误差;监测过程中,接收仪器容易因为解除不良或受环境温度、湿度等因素影响也常带来一定的观测误差;测斜仪电缆在长期负重情况下,长度会发生变化,这样就影响了实际测头的位置。

1.2 本课题研究的目的是意义

公路路堑边坡工程一般服务年限很长、地质环境复杂,要进行长期的监测非常困难。当前,工程中最常用的电测系统,存在若干根本性缺陷,如需要电源、对测点物性有影响、耐久性较差、易受水腐蚀和电磁场干扰、信息量有局限等,已不能满足要求。因此,急需一种更先进的技术手段来解决此问题。

光纤光栅传感技术是继电测技术之后的传感技术新阶段,它满足了测量的高精度、远距离和长期性的技术要求,为解决上述问题提供了良好的技术手段^[6]。

本文研究的攀田高速公路地段高边坡的现场监测及稳定性分析,该高速公路高边坡主要地质特征为全风化石英散砂岩、强风化石英散砂岩,岩体完整性系数小于 0.2,强度也很低,属于散体结构岩体,与土质边坡相似对待,

滑裂面一般呈圆弧状, 攀枝花雨季降水较多, 对边坡的稳定性造成很大的影响, 鉴于汶川大地震所诱发的大规模山体滑坡, 造成道路堵塞, 严重损害人民生命财产, 不利于抗震救灾工作的展开^[7]。

现有的边坡竖向测斜仪是通过测量测斜管轴线与铅垂线之间的夹角变化量, 计算得到土体沿测斜管轴线不同高程的水平位移, 一般来说, 在一根竖直的带有导槽的测斜管内, 逐段测量变形后测斜管轴线与铅垂线的夹角, 分段求出不同高程的水平位移。

边坡稳定性的数值模拟主要研究方法有简化毕肖普(Bishop)法, 间布(Janbu)法, 剩余下滑力法等^[8]。由于圆弧滑裂面条分法沿用了土坡稳定分析中的条分法(瑞典条分法或 Bishop 法), 滑裂面采用圆弧滑裂面假设, 该法是基于极限力矩平衡法的一种经典分析方法, 只考虑土钉的拉力, 适用于任意条件下的情况, 在计算安全系数时将土钉拉力对安全系数的贡献也考虑了进去, 此法我国目前工程界采用最为广泛的一种边坡监测及稳定性分析研究概况及分析。

1.3 国内外研究现状

国际上将光纤传感器用于大型工程结构的健康监测(Structural Health Monitoring,简称 SHM)时间不长, 特别是应用于岩土工程的健康监测。

1978 年, 加拿大通信中心 Hill 等人^[9、10]制成了世界上第一根光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,FBG),该光栅的制作使用了驻波法, 将 488nm 的氩离子激光在掺锗光纤中传播, 观察到入射光与反射光在光纤中形成的驻波干涉条纹, 在一段时间后, 该驻波能够引起纤芯折射率沿光纤轴向发生周期变化, 从而首次发现了光纤中的光栅效应。该方法反射率高达 100%。但是制作的光栅周期受到入射光波长的限制, 该技术并未得到快速的发展。

1989 年, Mendz 等人^[11]最早提出了将光纤光栅传感器应用于混凝土的结构监测中。此后日本、美国等国家对光纤传感系统进行了深入而广泛的研究, 研究范围扩展到了桩柱、地基、桥梁、大坝、隧道、大楼、地震和山体滑坡等复杂系统的测量或监测。

1993 年 Lemaire 等人^[12]提出了一种提高光纤敏感性的简单有效的办法即低温高压载氢技术, 他们将光纤浸入 20~750 个大气压的氢气中, 使氢离子扩散到光纤纤芯内部, 然后再利用紫外光写入光栅, 该方法光纤敏感性提高了 100 多倍, 载氢技术极大地降低了光纤光栅的制作成本。

Idriss^[13]在美国新墨西哥州的 Puerco 桥上布设 40 多个位移光纤传感器和 24 个温度传感器。光纤传感器预埋入结构中, 浇注后监测梁的预应力损失。

Kronenberg 和 Glisic^[14]等在瑞士和法国边界上对 Emosson 大坝进行了光纤传感器的健康监测。

Inaudi^[15]等在一个隧道旁 30 米的距离修建的另一个隧道壁上安装了 8 个距离不等的光纤深长计, 安装位置为从已存的隧道通向新隧道的小孔洞内, 监测修建隧道时土石的受压情况、隧道监测。计算结果表明伸长计的变形量与距离新隧道垂直距离的远近呈指数下降趋势。

Ferraro^[16]等人详细地探讨了光纤光栅传感器的原理、监测方法温度补偿等各种解决方法。

Udd^[17]等在桥梁上安装了光纤光栅传感器, 结果表明, 该传感器不仅可以监测车辆的行驶速度, 而且可以监测车辆的总量。

在国内, 光纤光栅技术刚刚兴起, 许多单位对其制作研究也都投入了相当的精力, 并取得了非常显著的成果。清华大学、吉林大学、中科院半导体所、上海光机所等, 对光纤的光敏性、成栅机理、光波传输规律等问题进行了深入研究。

哈尔滨工业大学结合土木工程长期监测的需要, 将 FBG 传感器进行二次开发, 研制了光纤布拉格光栅毛细金属管式封装应变传感器, 光纤布拉格光栅片式封装应变传感器和光纤布拉格光栅封装温度传感器, 并在实际工程中得到了广泛的应用^[18]。

2001 年哈尔滨工业大学欧进萍等人^[19]对黑龙江省呼兰县的呼兰河大桥进行健康监测, 该桥全长 420 米, 最大跨度为 42 米, 是国内较大的预应力钢筋混凝土箱形梁桥。呼兰河长期泥沙淤积、软土覆盖层很厚、施工条件恶劣、施工复杂、工期短、交通流量大、温差大等。将 15 个光纤光栅传感器布设在大桥的预应力箱梁上, 其中包括 12 个光纤光栅应变传感器和 3 个光纤光栅温度传感器。监测预应力箱形梁张拉过程中钢筋的应变历程以及箱形梁静载试验的钢筋应变增量与分布, 在大桥服役阶段监测车辆荷载下大桥的应力变化情况。

2003 年 5 月香港理工大学^[20]将光纤光栅传感系统在青马大桥安装了 40 个光纤传感器分成三个阵列, 分别在青马大桥的摆架揽线上, 支座以及桁架上, 对青马大桥进行了实时的监测。

2003 年 12 月, 上海紫珊光电技术有限公司与同济大学合作^[21], 将自主研发的 FBG 传感器成功应用于上海卢浦大桥, 对大桥的动态应变进行测量。

1979年 Tavenas^[22]首先提出了在岩土工程中应用测斜仪检测路堤软土的侧向变形。

2005年 Xingmin Hou, Xueshan Yang, Qiao Huang 等人^[23]在室内利用 QY 测斜仪测量简支梁的挠度, 与梁的实际挠度吻合, 并且将 QY 测斜仪应用于 Taolaizhao 大桥, 对 6 跨桥进行检测, 与电子系统对比监测该桥在卡车经过时的挠度变化。

2007 年剑桥大学, Hisham Mohamad, Peter J. Bennett, Kenichi Soga, Assaf Kalar, Adam Pellow 等人^[24]利用分布式光纤传感器系统制作了深部测斜仪, 同时对抗滑桩进行监测, 对比检抗滑桩的变形, 证明了光纤传感器系统制作的深部测斜仪的可用性。

2007 年 M. Nishio, T. Mizutani, N. Takeda 等人^[25]提高 BOTDA 监测系统, 发明了 PPP-BOTDA 系统, 提高其位移分辨率, 并且将光纤封装到高强度复合材料板中, 将该板一端固定, 通过悬臂梁理论以及与应变片测量结果对比, 通过建立一定的分析方法, 来证明其测量精度。

1.4 本文主要研究内容

首先在室内采用相位掩模法制作光纤光栅, 然后进行现场制作光纤布拉格光栅锚杆应变监测传感器和带有光纤布拉格光栅传感器的深部测斜仪, 考虑了传感器在锚杆和深部测斜仪上的布设、深部测斜仪在边坡上的布设及各种保护措施。

本文的研究工作主要包括一下几个方面:

- 1) 定时采集现场监测数据, 对监测的数据进行分析;
- 2) 由光栅光纤传感器的点应变通过材料力学的理论推导得到锚杆的轴向拉力;
- 3) 利用差分方法离散方法计算深部测斜仪挠度;
- 4) 建立最优化数学模型根据现场监测数据来确定深部测斜仪当前潜在滑裂面的位置;
- 5) 应用加拿大岩土分析软件 Geo-slope 中的 Slope/W 模块对所监测的 12 个边坡进行数值模拟, 得到各个边坡加固前后的潜在滑裂面位置和最小安全系数, 与深部测斜仪监测数据所得滑裂面对比分析, 分析施工操作平台对于边坡稳定系数的影响, 对去除平台前后的边坡进行模拟, 从而得到操作平台对于边坡稳定系数的影响; 针对攀枝花市区靠近二滩水库, 雨季降水量大的

特点，分析地下水位对于边坡稳定性的影响。

将现场监测数据所得边坡安全系数与数值模拟结果进行对比，分析监测结果的合理性以及锚杆预应力损失，本文的具体思路和流程如图 1-1 所示。

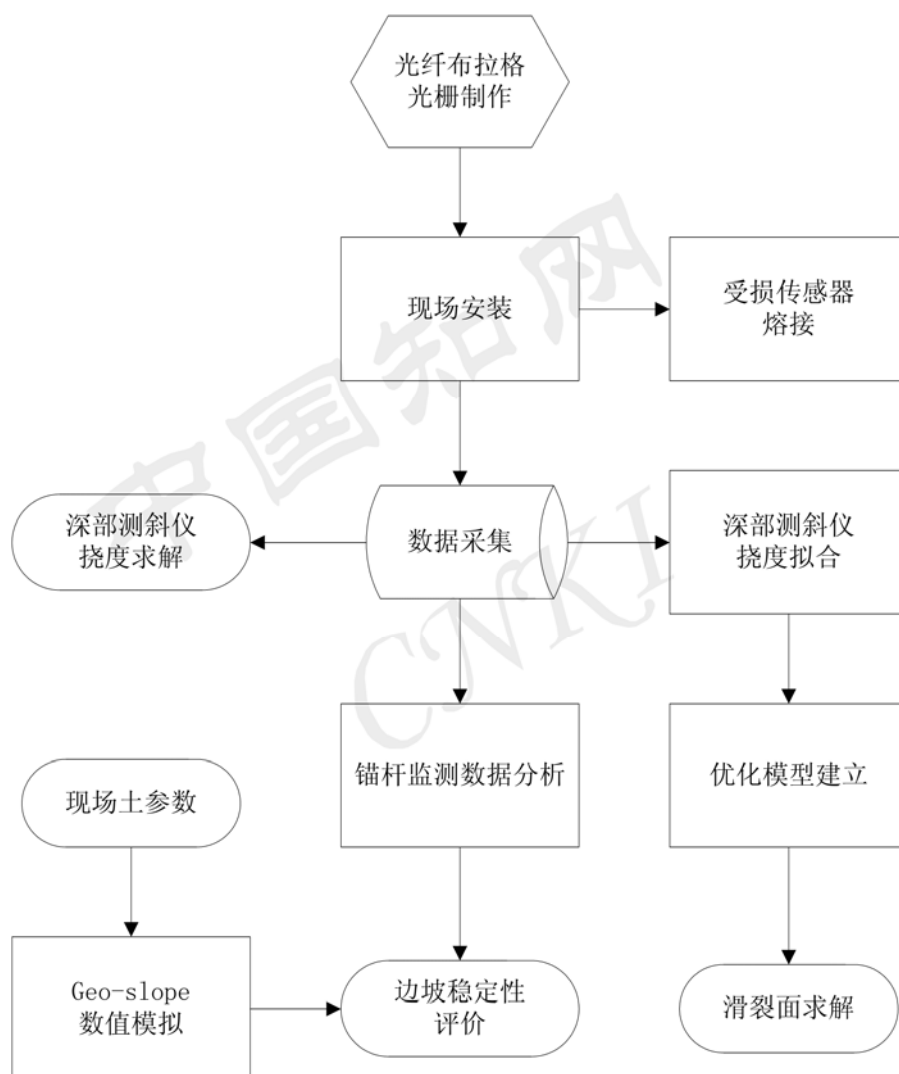


图 1-1 论文工作流程图

Figure1-1 Flow diagram of the thesis

第2章 光纤布拉格光栅传感器现场安装及布设

2.1 引言

光纤布拉格光栅传感器是一种全光纤无源器件,是用光纤布拉格光栅作敏感元件的功能型光纤传感器^[26]。它除了具有普通光纤传感器尺寸小、重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、使用安全可靠等优点外,还具有其独特的优点:如抗干扰能力强;易于构成传感网络;测量对象广泛,易于实现多参数传感测量等等^[27]。正是由于这些优点,使得光纤布拉格光栅传感器系统近年来在实际应用领域取得了长足进展。

在边坡工程中,光纤光栅传感器既可以贴在锚杆的表面,也可以在粘贴在深部测斜仪上埋入边坡中对边坡内部土体进行实时测量,监视缺陷的形成和生长,通过监测边坡的应变分布,可以得知局部荷载的状态。因此,光纤光栅传感器成为边坡监测的最重要手段^[28]。

2.2 攀田高速公路边坡工程概况

攀枝花至田房高速公路(简称攀田高速公路)起于攀枝花市的金江镇,北接西昌至攀枝花高速公路,经攀枝花市总发乡、大田乡,止于平地镇田房村(攀枝花与云南交界处),南接云南省境内的永仁至昆明高等级公路。攀田高速全长59公里,全线采用四车道的高速公路标准建设,设计时速为80公里。

攀田高速公路高边坡支护工程采用的锚杆直径分别为 $\Phi 28$, $\Phi 36$,长度分别为6米、9米、12米、15米的螺纹钢筋,锚固时分锚固段和自由段,锚固段直接由水泥砂浆与岩体连为一体,在自由段套上PVC(polyvinylchloride 聚氯乙烯)管后外层浇灌水泥砂浆,锚固段设计长度为6.5m,锚杆既起到加固作用,又不会使设计失效。锚杆在施加预应力锚固后,由于各种自然因素、人为因素和杆体材料的蠕变、锚具效率损失等影响,在相当长的时间内,其锁定预应力必然会发生变化,变化严重时甚至会导致整个工程结构的失效,根据设计院要求应用光纤布拉格光栅传感器对攀田高速高危边坡进行两年的健康监测。

根据四川省交通厅规划勘察设计研究院提供的攀田高速公路路堑边坡防护补充设计说明:攀田高速公路地质情况较复杂,在初步设计、施工图设计

阶段已经进行了大量的地质勘探和地质调查工作，基本查明沿线出露地层分布状况、岩层性质等设计基础资料。但由于岩层破碎、风化严重，裂隙、岩脉发育，尤其是全风化带覆盖厚度较大，岩层中裂缝、岩脉等构造及节理钻探难以揭示，虽然地质调查部分发现但由于地质构造的复杂多元性，对攀田路路堑边坡防护设计造成很大困难；同时还存在很多认识不足的问题。

施工开挖对路堑边坡地质状况进一步揭示，根据对开挖路堑边坡的现场调查，发现较多路段地质情况与地勘资料存在一定差异。通过对原设计复查，按原防护设计方案进行施工，极易导致边坡失稳，必须采取有效的工程措施对路堑边坡进行防护和加固，以保证路堑边坡的稳定性，对其中12个高危边坡进行健康监测，现场边坡如图2-1所示。



图2-1 攀田高速公路边坡

Figure2-1 Slope of Pan-Tian highway road

2.3 光纤布拉格光栅传感器的原理及制作

2.3.1 光纤布拉格光栅传感器简介

光纤光栅主要分两大类：Bragg光栅和透射光栅；光纤光栅从结构上可分为周期性结构和非周期性结构；从功能上还可分为滤波型光栅和色散补偿型光栅^[29]。

光纤光栅是利用光纤中的光敏性制成的，所谓光纤中的光敏性是指激光

通过掺杂光纤时,在纤芯内产生沿纤芯轴向的折射率周期性变化,从而形成永久性空间的相位,光纤光栅的折射率将随光强的空间分布发生相应变化。而在纤芯内形成的空间相位光栅,其作用的实质就是在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤波器或反射镜。当一束宽光谱光经过光纤光栅时,满足光纤光栅布拉格条件的波长将产生反射,其余的波长将透过光纤光栅继续往前传输,利用这一特性可制造出许多性能独特的光纤器件。

当光纤光栅所处环境的温度、应力、应变或其它物理量发生变化时,光栅的周期或纤芯折射率将发生变化,从而使反射光的波长发生变化,通过测量物理量变化前后反射光波长的变化,就可以获得待测物理量的变化。

通过特定的技术,可实现对应力和温度的测量,也可同时测量两者。通过在光栅上涂敷特定的功能材料如压电材料,还可实现对电场等物理量的间接测量。这种传感器最大的优点是光纤应变与波长存在一一对应的关系,这就使精确测量应变成为可能,同时也避免了电源的干扰,而这正是其它传感器的缺点。

光源性能的好坏决定着整个系统所送光信号的好坏。在光纤光栅传感中,由于传感量是对波长编码,光源必须有较宽的带宽和较强的输出功率与稳定性,以满足分布式传感系统中多点多参量测量的需要。

光纤光栅传感系统中,信号解调一部分为光信号处理,完成光信号波长信息到电参量的转换;另一部分为电信号处理,完成对电参量的运算处理,提取外界信息,并显示出来。

对光信号的解调方法^[30]通常有:

1) 匹配滤波法,匹配滤波法是利用另一个光纤布拉格光栅传感器(参考光栅),在驱动元件的作用下借助外差载波技术来跟踪光纤布拉格光栅传感器(传感光栅)的波长变化,使得参考光栅的反射波长在某个时刻或某段时间内和传感光栅的反射波长一致,该方法结构简单、线性度好。该方法可以实现静态测量。但这种方法的不足之处是两个光栅要严格匹配,且传感光栅的测量范围不大;

2) 光谱编码/比例解调,光纤传感器可以利用发光二极管、强光二极管等宽频光源进行传感信号的光谱解调。光谱比例法适用于光路长度以光源波长为序的传感器信号的还原,光谱发生变化。为了监测这种变化,输出光束将一分为二,分别由传输带宽不同的双色滤波器监测。测量引起的光谱变化可以由传感器间的信号比例关系推导出来。要求使用低强度光源是这种方法的主要缺陷,同时考虑到光能衰减,就减少了多路复用的可能性;

干涉法,滤波解调法结构简单,但很难进一步提高其传感精度。干涉法却具有更高精度,可以大大提高传感分辨力。可调窄带光源解调法可获得很高的信噪比和分辨力;

3) 可调谐F-P滤波器法,可调谐F-P滤波器法是传感阵列光纤布拉格光栅传感器的反射信号进入可调光纤F-P滤波器,调节透射波长至光纤布拉格光栅传感器的反射峰值波长时,滤波后的透射光强达到最大值,由FFP驱动电压—透射波长关系可得光纤布拉格光栅传感器的反射峰值波长。该解调法可实现动态和静态的测量。由于FFP滤波器腔的调谐范围很宽,可以实现多传感器的解调,但高精度FFP成本较高。

2.3.2 光纤光栅的基本结构

光纤光栅的基本结构是两层圆柱状媒质,内层为纤芯,外层为包层,包层以外为涂敷层;纤芯的折射率比包层的折射率稍大。当满足一定的入射条件时,光波能沿着纤芯向前传播。

图2-2为单根光纤结构图。光纤的包层外边的涂敷层可以保护光纤免受环境污染和机械损伤。有的光纤还有更复杂的结构,以满足不同的使用要求。

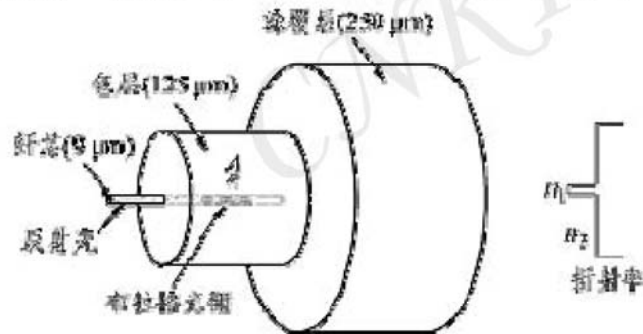


图2-2 光纤光栅结构图^[31]

Figure2-2 The structure of FBG^[31]

光纤光栅的写入方法可以分为内部写入法、干涉法、逐点写入法以及相位掩模写入法,其中,相位掩模法具有工艺简单、重复性好、成品率高、便于大规模生产、光栅周期与曝光用的光源波长无关等优点,得到了广泛的应用。

2.3.3 光纤布拉格光栅的制作

内部写入法又称驻波法,将波长 488nm 的基模氩离子激光从一个端面耦合到锗掺杂光纤中,经过光纤另一端面反射镜的反射,使光纤中的入射和反射激光向干涉形成驻波。由于纤芯材料具有光敏性,其折射率发生相应的周期变化,于是形成了与干涉周期一样的立体折射率光栅,它起了布拉格反射器的作用。

Meltz 等人^[11]最早提出一种在光敏光纤中写入布拉格光栅的外部写入法即干涉法,他们利用干涉仪原理将入射紫外光分为两束,然后两束光重新组合形成干涉场侧面曝光光敏光纤,这样在光敏光纤的纤芯中就会形成永久性的折射率改变。制作光纤光栅的干涉方法主要有两种:分振幅干涉法和分波前干涉法。

相位掩模法是采用电子束平板印刷或全息曝光蚀刻于硅基片表面的一维周期性透射型相位光栅,其实质是一种特殊设计的光学衍射元件。

1993 年, Hill 等人^[4]首次采用相位掩模法成功写入光纤布拉格光栅,光源为 248nm 的 KrF 准分子激光器,相位掩模采用零级抑制位相掩模。

与此同时,美国贝尔实验室的 Anderson 也用相位掩模法成功的制作了光纤光栅,他们使用的相位掩模周期为 519nm 采用斜入射。

由于相位掩模法具有许多独特的优点,因此,已经成为制作光纤布拉格光栅的首选方法。这种方法的最大优点是写入光纤布拉格光栅的周期仅由位相光栅掩模的周期和写入光束的方向决定,而与写入光的波长无关,工艺简单,重复性好,成品率高,便于大规模生产,对光源的时间相干性和单色性要求较低。相位掩模法可以写入均匀周期的光栅。

相位掩模法大大降低了光纤光栅制作的复杂程度,只需要一个光学器件就可制作较强和比较稳定的光纤光栅,本文中所用光纤布拉格光栅传感器均采用相位掩模法制作^[21],典型的制作设置如图 2-3 所示。

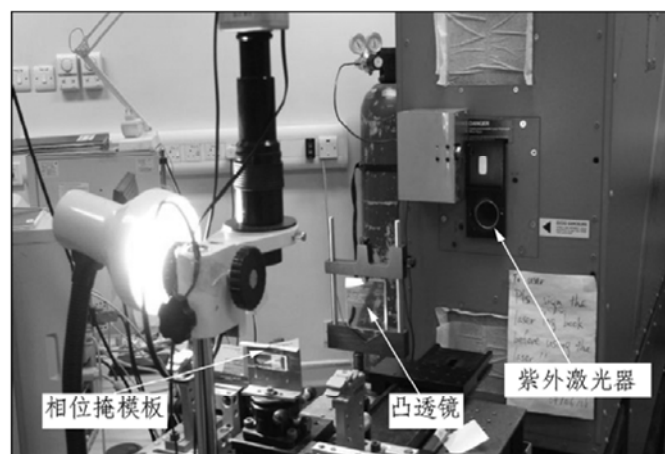


图 2-3 光纤 Bragg 传感器制作
Figure2-3 Device of producing sensors

2.3.4 光纤布拉格光栅传感器工作原理

光纤布拉格光栅由于其传感灵敏度高、可靠性好等优点，是国际上应用较为广泛的光纤传感技术，简称光纤光栅，其工作原理如图 2-4 所示。当入射光进入光纤时，布拉格光栅会反射特定波长的光，该波长满足式 2-1 的特定条件：

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2-1)$$

式中 λ_B ——反射光的中心波长，一般为 1510 到 1590nm 左右；
 n_{eff} ——光纤的有效折射率；

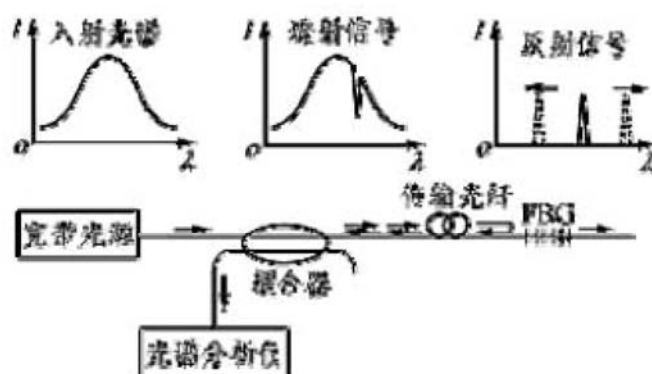


图 2-4 光纤布拉格光栅工作原理^[31]
Figure2-4 Principal of FBG^[31]

Λ ——光纤光栅的栅距。

光纤光栅的中心波长值是与其应变和温度有关的物理量，当光栅受到拉伸或者受热膨胀时， λ_B 增大；当光栅压缩或者遇冷时， λ_B 减小。对于采用标准单模石英光纤制成的光纤光栅， λ_B 随温度和应变的变化规律可以用式(2-2)来表示：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B0}} = (1 + p^{eff})\Delta\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (2-2)$$

式中 $\Delta\lambda_B$ ——中心波长的变化量；

λ_{B0} ——不受外力、温度为 0℃ 时该光栅的初始中心波长；

$\Delta\varepsilon$ ——光纤光栅所受的应变；

ΔT ——温度的变化量；

α ——光纤的热膨胀系数；

ζ ——热光系数；

p^{eff} ——光弹系数。

2.4 光纤传感器的现场安装布设

2.4.1 光纤布拉格光栅在锚杆上的安装

攀田高速高边坡支护锚杆根据其位置的不同，采用不同长度和型号，对于每个监测的边坡，为了能够监测出滑裂面位置，我们选择具有代表性的断面进行监测，所监测锚杆的数量和型号见表 2-1。

表 2-1 攀田高速边坡监测锚杆型号和数量

Table2-1 Types and length of anchors in Pan-Tian highway road

锚杆长度 (m)	数量(根)	直径(mm)	灌浆长度(m)	预应力大小 (kN)
6	6	Φ28	6	0
9	20	Φ28	9	0
12	24	Φ32	9	100
15	20	Φ32	9	100

本课题所研究的攀田高速高边坡工程均采用光纤布拉格光栅传感器，对

锚杆进行应变监测, 光纤传感器为未进行封装的裸光纤, 为了避免光纤光栅应变传感器在施工过程中损伤, 防止光纤光栅信号传输线在施工过程中被破坏, 制定了相应传感器的布设工艺, 且传感器由 6 毫米的光缆引出, 光纤传感器的室内连接, 应用光纤熔接机将 3 个不同波长的光纤布拉格光栅传感器传感器串联在一起, 其间隔分别为 2 米, 2.5 米, 中间用跳线连接, 连接处用热塑套管保护, 赋予纤芯一定的刚度。具体过程如下:

1) 为了保证光纤光栅传感器与钢筋的充分接触, 避免光纤光栅弯曲导致传感误差, 应首先用打磨机对待测钢筋进行抛光, 然后用砂纸打磨, 使钢筋表面平整光滑;

2) 用光学纸蘸酒精将打磨处擦洗干净, 避免粉尘、油污对表面的污染, 增加钢筋与环氧树脂的结合强度;

3) 光纤光栅传感器沿着钢筋待测应变方向纵向布置, 采用 502 胶将光纤光栅传感器紧密固定在锚杆上;

4) 如图 2-5 所示, 将温度传感器放入铜管内, 保持放松状态, 温度传感器采用金属管式光纤传感器, 光纤光栅无增敏型温度传感器的封装机构主要由金属铜管、胶粘剂、光纤光栅以及传输光缆组成。铜管的主要作用是保护光纤光栅免受外界应力的冲击, 同时保持光纤光栅与结构处于相同的温度场, 同时悬空光纤光栅, 使光纤光栅免受外界影响。从结构上看, 该封装不仅保持了裸光纤光栅的温度灵敏度, 能够自由的感应结构对象的温度变化, 而且充分消除掉了外界应力的影响;

5) 在锚杆表面分层涂抹环氧树脂, 保证环氧树脂完全覆盖钢纤和连接的跳线, 尽量减少因环氧树脂流动而导致锚杆表面敷胶过多对锚杆受力造成影响;

6) 光纤光栅传感器保护考虑传感器的缓冲与防潮, 在环氧树脂表面粘贴一层胶皮。

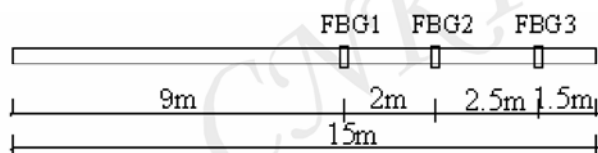


图 2-5 光纤布拉格光栅温度传感器

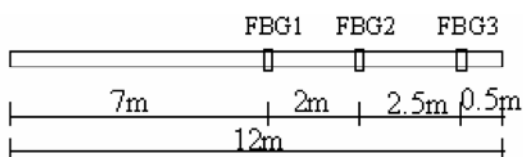
Figure 2-5 Fibre optical Grating temperature sensor

采用上述的布设工艺, 锚杆安装结束后, 布设光纤布拉格光栅应变传感器全部完好, 说明该工艺完全适合光纤光栅传感器的安装与保护. 装有光纤布拉格光栅传感器的锚杆插入预先钻好孔内, 再向孔里用高压浇筑水泥砂浆, 水泥砂浆基本凝固定型后就可以进行数据采集。

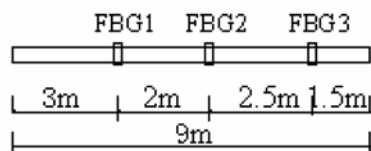
本课题共监测锚杆 70 根, 每根锚杆均布设 3 个以上的应变传感器以及一个温度传感器, 应变传感器的布设如图 2-6 所示。



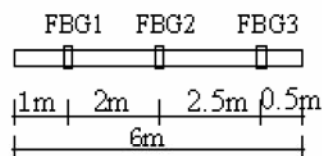
a) 光纤布拉格光栅传感器在锚杆(15 米)上的布设



b) 光纤布拉格光栅传感器在锚杆(12 米)上的布设



c) 光纤布拉格光栅传感器在锚杆(9 米)上的布设



d) 光纤布拉格光栅传感器在锚杆（6 米）上的布设

图 2-6 光纤布拉格光栅传感器在锚杆上的布设

Figure2-6 Distribution of Fiber Bragg Grating sensors on anchors



图 2-7 传感器安装完成

Figure2-7 Sensors installed onto anchors

传感器安装完成后的锚杆如图 2-7 所示，现场边坡锚杆侧向孔孔径为 110mm，孔与水平面的夹角为 15 度。

2. 4. 2 光纤布拉格光栅传感器在深部测斜仪上的安装布设

深部测斜仪的制作安装 如图 2-8 所示，深部测斜仪采用高强 PVC 管，测斜管是用聚氯乙烯、ABS 塑料、铝合金等材料制成，管外有沿外侧成 180°，塑料测斜管的内径为 $\Phi 58$ ，外径为 $\Phi 70$ ，每段长度为 2 米，中间用耦合器连接在一起。

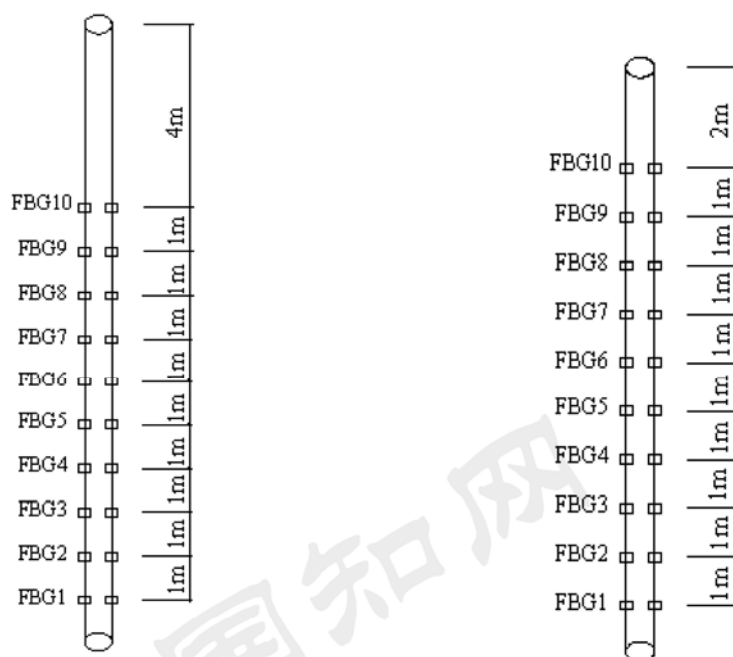


图 2-8 深部测斜仪

Figure2-8 Installation of Inclinometer

深部测斜仪所采用的高强 PVC 管两侧均有凹槽, 光纤光栅传感器串联后放入凹槽内, 将传感器位置贴近凹槽, 并且保证每一米一个光纤光栅传感器, 两侧都是十个, 在实际操作中由于传感器波长数量不足, 如图 2-9 所示, 我们将光纤光栅传感器为两段, 上侧采用 4 个传感器串联, 6 个传感器串联, 在传感器底部连接回线, 这样既保证传感器的安全, 又降低了传感器本身造成的噪音扩大化, 保证了监测信号的质量。

深部测斜仪数据进行采集, 通过 10 个光纤布拉格光栅传感器来监测深部测斜仪的变形来反映边坡相应位置的变形, 深部测斜仪刚度低, 我们可以近似地将深部测斜仪的变形作为边坡的变形。



a) 14 米深部测斜仪传感器布置

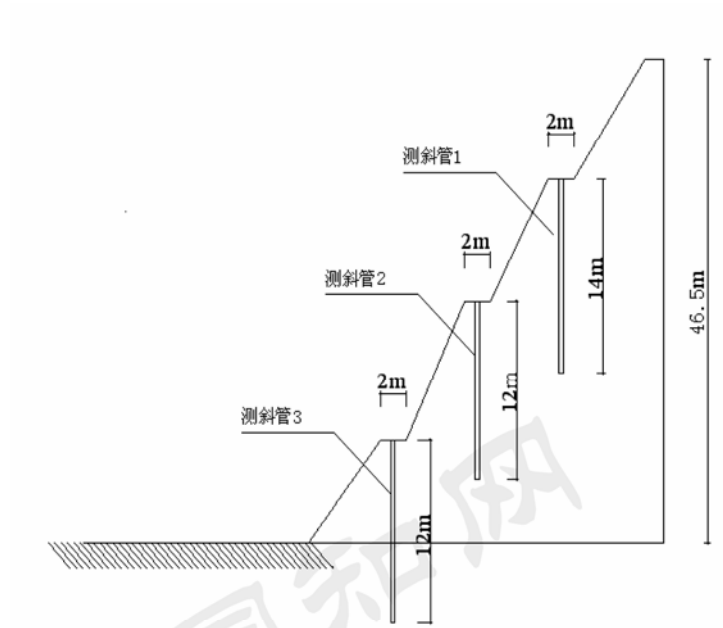
b) 12 米深部测斜仪传感器布置

图 2-9 深部测斜仪传感器布置

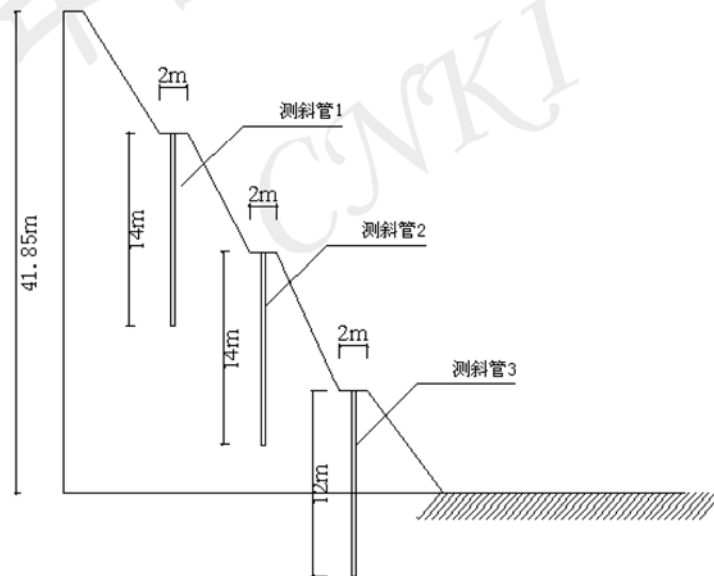
Figure2-9 The distribution of sensors on inclinometers

针对攀田高速公路路堑边坡的地质情况和滑坡的特征，我们选择每个断面间隔式布置传感器，其中：

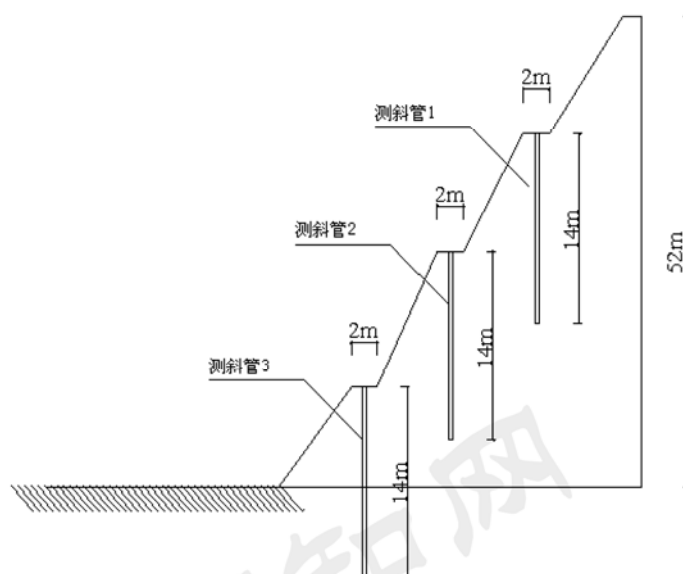
- 1) 第二合同段深部测斜仪监测边坡(简称 EI2)如图 2-10 中图 a 所示：三根光纤原位测斜仪作深部位移监测总共钻孔 38 米；
- 2) 第三合同段深部测斜仪监测边坡(简称 EI3)如图 2-10 中图 b 所示：三根光纤原位测斜仪作深部位移监测总共钻孔 40 米；
- 3) 第四合同段深部测斜仪所检测第一个边坡(简称 EI41)如图 2-10 中图 c 所示：无加固，无框架梁，两根光纤原位测斜仪作深部位移监测总共钻孔 28 米；
- 4) 第四合同段深部测斜仪所监测第二个边坡(简称 EI42)如图 2-10 中图 c 所示：有加固，但无框架梁，三根光纤原位测斜仪作深部位移监测总共钻孔 42 米。



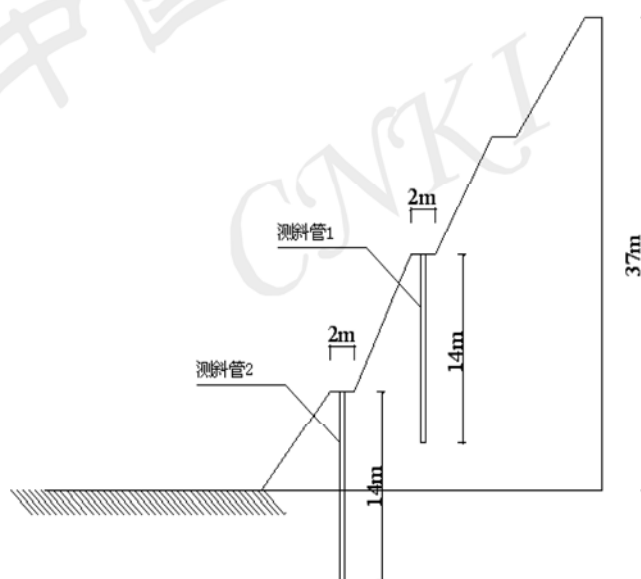
a) EI2 边坡深部测斜仪布设



b) EI3 边坡深部测斜仪布设



c) EI41 边坡深部测斜仪布设



d) EI42 边坡深部测斜仪布设

图 2-10 深部测斜仪在边坡上的布设位置

Figure2-10 Positions of inclinometers in different slopes

深部测斜仪布置的合理性 通过 Geo-slope 软件对深部测斜仪所监测的边坡进行分析，得到了边坡施工完成后，所监测各个边坡的潜在滑裂面，从而可以确定深部测斜仪的布置位置如图 2-11 所示。

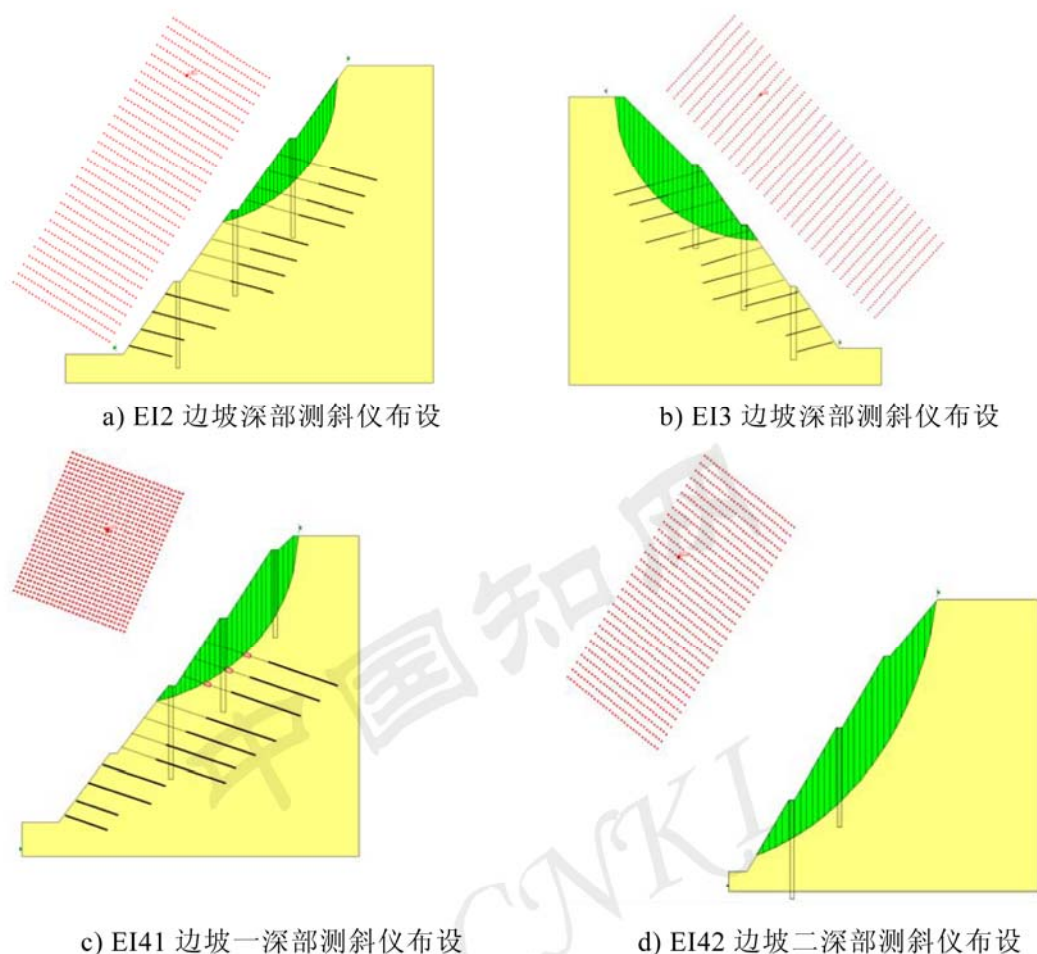


图 2-11 各标段深部测斜仪布设位置

Figure 2-11 The distribution of inclinometers in the slopes

深部测斜仪在边坡上的安装 将光纤光栅传感器串联后贴入深部测斜仪中，在攀田高速公路上分别对 4 个边坡进行监测，深部测斜仪采用 12 和 14 米两种，光纤布拉格光栅传感器传感器布置在深部测斜仪的底部 10 米处，每米一个，在每一级台阶上分别竖向孔，将深部测斜仪放置在孔的中央，然后对孔外部进行灌浆，保持深部测斜仪内没有混凝土进入。

深部测斜仪得埋设的具体步骤如下：

1) 钻探的孔径为 $\Phi 120$ 的竖向孔，因为沙土钻孔很容易塌空，需要泥浆跟进；

2) 安装传感器，安装之前队传感器进行监测，保证耦合器的位置连接牢固，且不出出现弯曲，将深部测斜仪的底部用相应的安全护盖堵上，保证水泥砂浆不进入深部测斜仪当中，首先将下部 6 米的深部测斜仪放入到孔中，然

后将所有跳线从深部测斜仪的孔中穿出，用耦合器将 6 米和 4 米的深部测斜仪连接在一起；

3) 等孔中的地下水深出后，将水泥砂浆灌入孔中，同时保证深部测斜仪竖直，分时段灌浆；

4) 水泥砂浆凝固后，安装保护箱，对所有跳线头进行编号，记录深部测斜仪编号、孔深、孔口位置、埋设日期等。

2.5 数据采集

2.5.1 数据采集时间安排

有关边坡监测周期、频率和工作量可参四川省交通厅公路规划勘察设计院(简称设计院)的设计书和图纸，监测周期为两个水文年(共 15 个月)。

其中锚杆和深部位移监测：

- 1) 遇强降雨及突发性暴雨后增加 1 次监测；
- 2) 边坡施工完成后至道路通车前时间内，每 20 天监测 1 次；
- 3) 道路通车 1 年时间内，每 1 个月监测 1 次；
- 4) 每次监测均须对数据进行分析并判断边坡加固后稳定之工作状态。

对监测数据进行分析和对加固后的边坡进行稳定评估一次，都要对上面的 1 个加固后的边坡的监测数据进行分析，得到锚杆中的应变和受力大小和分布和边坡深部位移。据此，可知锚杆的受力状况，是否达到设计极限。锚杆加固后的边坡的稳定性，安全程度，是否要失稳等，及时通知相关部门采取相应措。

2.5.2 监测数据现场采集

本项目采用 MOI 公司生产的 SM125 解调仪如图 2-12 所示，进行数据采集，该仪器可以应用于桥梁、大坝、建筑物等长期健康监测；舰船和飞行器结构完好状态的连续监测；深井油压和温度测量，深海石油平台提升装置监测；电力使用的高压开关柜等温度测量。